FACULTAD de INGENIERÍA

Electricidad y Magnetismo

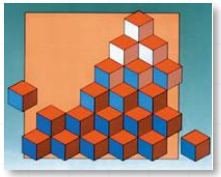
Dr. Alejandro Valderrama

CURSO de
Electricidad y Magnetismo

FACULTAD de
INGENIERÍA

Aspectos Generales

Objetivos de la Lección



Al terminar esta lección el alumno será capaz de:

- *Enunciar los Objetivos Generales del Curso.*
- *Listar los Temas del Curso.*
- *Explicar la importancia de trabajar con un Esquema Cognoscitivo.*
- *Distinguir los diferentes Criterios de Evaluación.*
- *Identificar aspectos básicos para el aprovechamiento del curso.*
- *Elegir un Proyecto de Investigación y uno Aplicativo Integrador.*
- *Reconocer las fechas importantes del Calendario de Actividades .*

Temario del Curso

Nombre de la asignatura: Electricidad y magnetismo

Área académica: Ciencias básicas

Clave de la asignatura: FIS3102 **Créditos**: 6

Objetivos generales de la asignatura

El alumno:

Analizará exhaustivamente problemas con aplicación a la ingeniería utilizando las definiciones y principios fundamentales de electrostática, electrodinámica y magnetismo, desde la forma de resolución de los mismos, hasta los resultados obtenidos.

Diferenciará el significado y la extensión de aplicación de las ecuaciones de Maxwell y características eléctricas y magnéticas de los materiales.

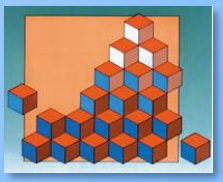
Examinará la incidencia que la aplicación y uso racional de la electricidad y el magnetismo, ha tenido como elemento transformador de las sociedades industriales y como elemento generador de avance científico, actuando como elemento para el bien común en la vida del hombre.

Temas del Curso

1. **Cargas eléctricas y campo eléctrico.**
2. **Ley de Gauss.**
3. **Potencial eléctrico.**
4. **Capacitores.**
5. **Corriente, resistencia y fuerza electromotriz.**
6. **Circuitos de corriente directa.**
7. **Campo magnético y fuentes de campo magnético.**
8. **Inducción e inductancia.**

Es importante mencionar que los temas se cubrirán de manera completa más no exhaustiva.

Técnica de Enseñanza



Partiendo de los objetivos generales del curso, todos los temas se desarrollan con base en el siguiente esquema didáctico:

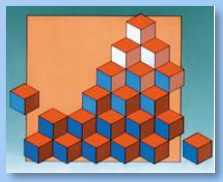
- *Explicación de conceptos relacionados con la materia a estudiar.*
- *Ejemplos sobre las implicaciones de los conceptos y su importancia.*
- *Presentación y desarrollo de las técnicas físico-matemáticas para aplicar los diferentes conceptos a la resolución de problemas particulares.*
- *Tareas (para realizar en casa) para que el estudiante pueda poner en práctica lo aprendido durante las exposiciones de los temas en clase.*

Además, en cada clase, se presentará el desglose de objetivos particulares de cada lección y los índices de contenido correspondientes.

Los temas se desarrollarán como compendios de conceptos y procedimientos físico-matemáticos interrelacionados de modo tal, que expliquen y enseñen la manera de resolver problemas concretos con aplicación directa en las ciencias e ingeniería.

Esta técnica de enseñanza pretende promover en el alumno un dominio consecutivo de habilidades específicas y concretas de manera sistemática, basada en la ejercitación de la aplicación de los conceptos mediante el uso de las herramientas de resolución de problemas mediante actividades dirigidas.

Esquema Cognoscitivo



La manera en que se pretende lograr el aprendizaje y dominio de los temas del curso por parte de los alumnos es desarrollando en cada exposición el siguiente esquema cognoscitivo:

- ***Incentivación:*** *Es importante antes que nada desarrollar un interés por los temas a estudiar.*
- ***Información:*** *El alumno deberá ser informado de que lo que va estudiar, su importancia y utilidad.*
- ***Comprensión:*** *El entendimiento de los conceptos de cada tema debe verificarse para garantizar el avance progresivo en la materia.*
- ***Aplicación:*** *Resulta indispensable para fijar los conocimientos aprendidos el realizar las tareas correspondientes a cada tema aplicando las técnicas de resolución de problemas .*
- ***Análisis:*** *Se promoverá en el alumno la capacidad de ahondar en los conocimientos del curso mediante la realización de un trabajo de investigación que le permita conocer la manera en que los temas estudiados se interrelacionan con aplicaciones concretas de la ciencia e ingeniería.*
- ***Síntesis:*** *Se fomentará en el alumno la capacidad de generar aportaciones a los temas estudiados mediante un proyecto aplicativo integrador.*
- ***Trabajo en Grupo:*** *Se propiciará que el alumno trabaje en equipo para que fortalezca sus capacidades de comunicación, organización, cooperación y liderazgo.*

Criterios de Evaluación

MODALIDAD DE EVALUACIÓN	PORCENTAJE DE LA CALIFICACIÓN
Tareas	30 %
Examen de Medio Semestre	15 %
Examen Escrito Final	15 %
Actividades de Investigación	10 %
Proyecto Aplicativo Integrador	20 %
Participación en Clase	10 %

Referencias

Halliday, D. et al (2001). Fundamentos de Física. Vol I. Tercera edición. México: CECSA.

Serway R.A. et al (2009). Física para ciencias e ingeniería. Vol I. Séptima edición. CENAGE.

Reese R.L. (2002). Física universitaria. Vol I. México: Thomson.

Puntos para el Estudiante

1. **Asistir a clase puntualmente:** con un 20 % de faltas (3/15) se pierde el derecho a la calificación aprobatoria. Llegar tarde o ausentarse de la clase más de 20 minutos se toma como falta.

2. **Poner toda la atención posible en clase:** queda estrictamente prohibido llamar por teléfono, enviar mensajes de texto, chatear y hacer búsquedas en internet que no estén solicitadas por el profesor durante la clase. Si el alumno desea atender alguna comunicación deberá hacerlo fuera del salón.

3. **Tomar notas detalladas de clase:** La física conviene escribirse.

4. **Hacer preguntas objetivas:** para comprender mejor la exposición de los conceptos.

5. **Tareas:**

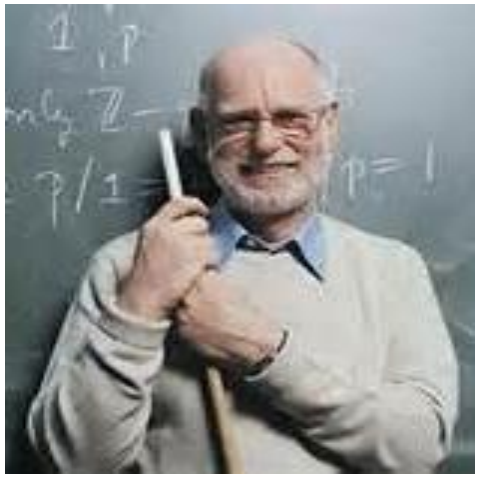
   - Iniciar la tarea el día que se dejó, comenzando con la lectura de cada uno de los problemas.
   - Dedicar al menos una hora de trabajo por cada problema de las tareas.
   - Traer preguntas relacionadas con la tarea la siguiente clase.
   - Deben realizarse lo más limpio y claro que sea posible, de preferencia en computadora.
   - Después de la fecha de entrega no se aceptarán las tareas.

La Responsabilidad de Estudiar

Afronta la realidad

Con frecuencia nos gusta criticar a los profesores cuando obtenemos malos resultados en la materia o malas calificaciones en los exámenes. Tienes que entender que el maestro sólo califica lo que tú pones en el examen, entonces, quien realmente se califica eres tú.

Es importante saber que **a ningún profesor le gusta reprobar a sus alumnos**, al contrario, esperan obtener buenos resultados de cada estudiante. Para un maestro el no poder ayudar a un estudiante a desarrollar sus potencialidades es muy frustrante y lo considera como un fracaso propio.



Enseñar no es tarea fácil, siempre hay profesores mejores que otros, pero debes recordar que la responsabilidad de estudiar es tuya y que ni los maestros ni nadie más tienen un control total sobre tus calificaciones.

La Responsabilidad de Estudiar

Pasos para asimilar y retener los contenidos

Ahora conocerás los cuatro pasos fundamentales para un estudio de calidad, conviértelos en algo habitual y automático en tu trabajo diario.

1. Forma una idea general del tema mediante una lectura rápida. Esta visión te servirá para conocer las ideas básicas: qué pretende el autor, qué te sugieren los subtítulos y qué conocimientos previos tienes sobre el tema.

2. Divide el tema en unidades menores: apartados, preguntas y párrafos. Busca la idea central de cada párrafo y plantea preguntas sobre ella. Subraya, haz esquemas y resúmenes.

3. Expresa las ideas principales de cada párrafo (mentalmente y por escrito) y relaciónalas. Hazlo sin ayuda del libro ni de los apuntes. Sintetiza las ideas y estructúralas por orden de importancia. Este tercer punto te sirve de autoevaluación.

4. Repasa lo estudiado en las clases anteriores. Evitarás posibles confusiones y realizarás un autoexamen de comprensión, asimilación y retención de contenidos básicos.

Esfuérzate a diario y verás que tendrás buenos resultados.

Es mejor el estudio individual, sobre todo en época de exámenes.

Trabajo de Investigación: un caso de estudio

CONTAMINACIÓN ELECTROMAGNÉTICA Y OTRAS RADIACIONES

1. ***Efectos de los campos electromagnéticos sobre la salud.***
2. ***Exceso de radiaciones en…***
   - ***Colegios***
   - ***Bibliotecas***
   - ***Oficinas***
   - ***Viviendas***
   - ***Gimnasios***
   - ***Industria***
3. ***Escuelas con y sin WiFi, seguridad para los alumnos y profesores.***

Trabajo de Investigación: un caso de estudio

CONTAMINACIÓN ELECTROMAGNÉTICA Y OTRAS RADIACIONES

Estudio de un caso particular: Se presentará el caso por escrito, basado en experiencias de la vida real de las personas, equipos y organizaciones.

Características del trabajo:

1. Será individual.
2. Contendrá un panorama de la situación y la problemática.
3. Resumirá la información descriptiva del problema a tratar.
4. Listará las decisiones que deben tomarse y propondrá soluciones.
5. Constará de un mínimo de 4 cuartillas (imágenes, hasta un 30%).

El alumno entregará el trabajo de investigación y hará una exposición de 10 minutos con métodos audiovisuales el viernes 4 de octubre.

PROYECTO APLICATIVO INTEGRADOR

ELECTROMAGNETISMO

Construcción de un dispositivo electromagnético: Se deberá construir un dispositivo electromagnético que muestre físicamente alguno de los conceptos presentes en el Temario del Curso y que pudiera tener alguna aplicación de interés.

Características del trabajo:

1. Podrá ser individual o en equipo.
2. En caso de que se trabaje en equipo, esto se deberá justificar ya sea por el grado de complejidad del trabajo o con el número de dispositivos presentados.
3. Podrán utilizarse los recursos del Laboratorio de la Universidad, así como solicitar asesorías al encargado del Laboratorio para su realización.

El proyecto se entregará el día 22 de noviembre y se acompañará su presentación con una breve exposición de hasta 10 minutos para mostrar su fundamento en la teoría y operación del dispositivo construido.

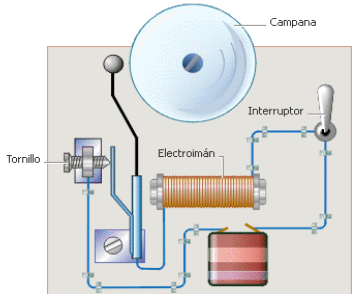
PROYECTO APLICATIVO INTEGRADOR

ELECTROMAGNETISMO

CON LABORATORIO

Bolígrafo de Chispa

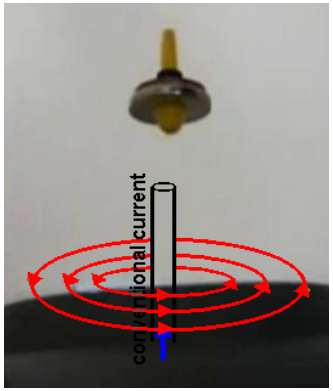
Jaula Electromagnética



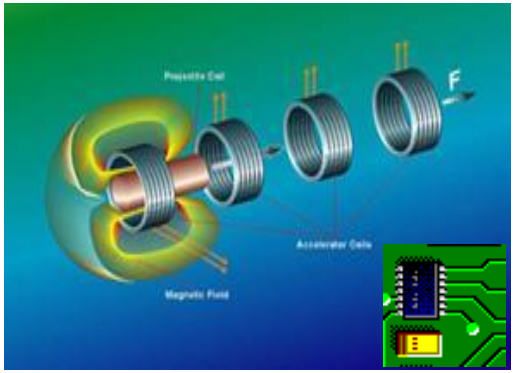
Electrobobina Timbre

Motor Elemental

Frasco Bombilla



Levitrón Magnético



Cañón de Gauss

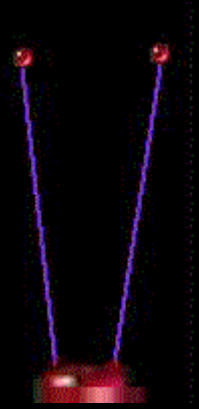
Calendario

SESIÓN	FECHA	ACTIVIDAD DEL PROFESOR	ACTIVIDAD DEL ALUMNO
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			

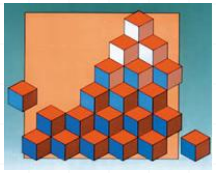
CURSO de
Electricidad y Magnetismo

FACULTAD de
INGENIERÍA

Ecuaciones de Maxwell



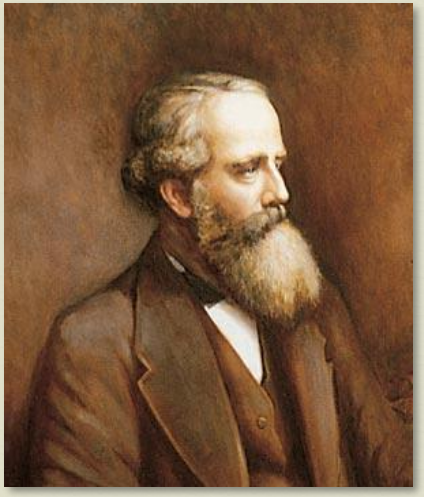
Objetivos de la Lección



Al terminar esta lección el alumno será capaz de:

- *Identificar los aspectos generales de la Teoría Electromagnética.*
- *Listar las características elementales de un Campo Eléctrico.*
- *Distinguir las diferencias entre Campo Eléctrico y Campo Magnético.*
- *Enunciar las cuatro Leyes del Electromagnetismo.*

TEORÍA ELECTROMAGNÉTICA



James Clerk Maxwell (1831-1879)

☙ ***Describe por completo los fenómenos eléctricos y magnéticos.***

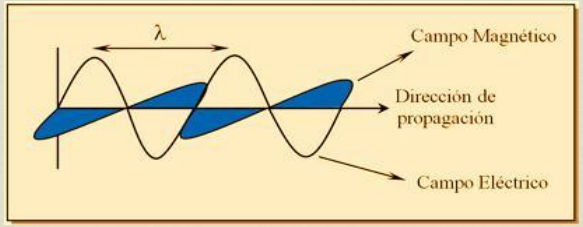
"A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field" (1865)

Se fundamenta en cuatro fenómenos básicos:

- La existencia de los campos eléctricos debido a las cargas eléctricas.
- La existencia de los campos magnéticos producto de los imanes.
- La aparición de campo eléctrico con la variación del flujo magnético.
- La producción de campo magnético por las cargas en movimiento.

La Teoría Electromagnética:

- Describe los fenómenos anteriores mediante ecuaciones diferenciales vectoriales lineales acopladas no homogéneas.
- Predice la existencia de ondas electromagnéticas con distintas longitudes de onda.



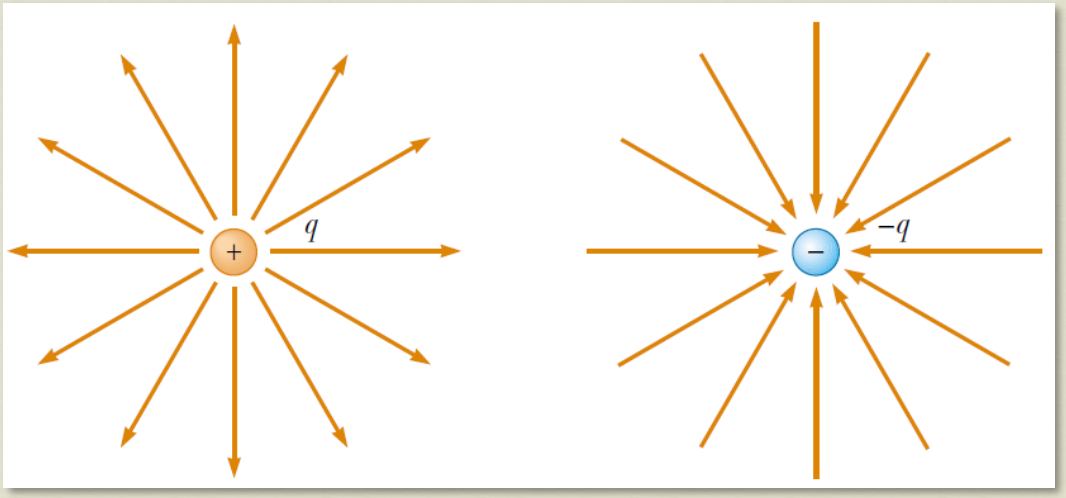
El Campo Eléctrico

Es la región del espacio cuyas propiedades han sido modificadas por la presencia de una carga eléctrica.

$$E = k\frac{q}{r^2}$$

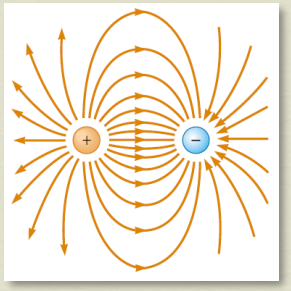
La constante *k* depende del medio.

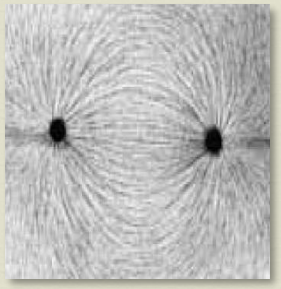
La líneas de campo eléctrico comienzan o terminan en una carga y pueden extenderse al infinito.



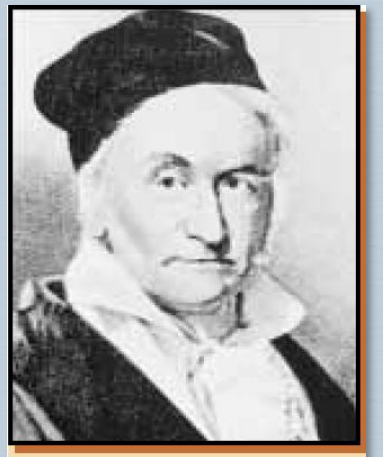
Fuente de campo eléctrico

Sumidero de campo eléctrico





Se pueden visualizar las líneas del campo, espolvoreando limaduras de hierro sobre una cartulina situada sobre objetos cargados.



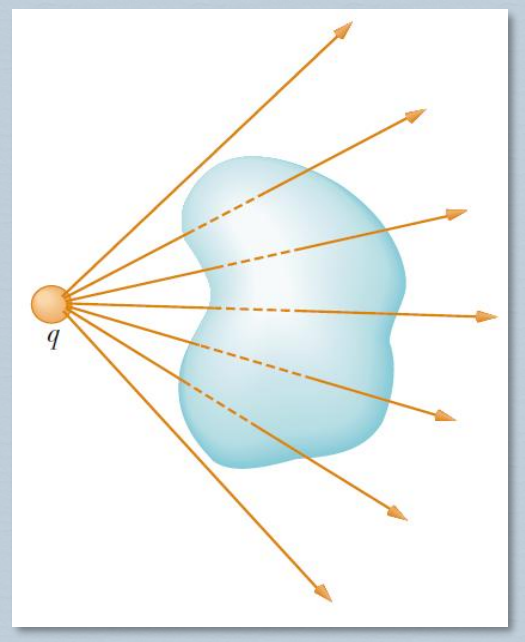
Karl Friedrich Gauss
(1777 – 1855)

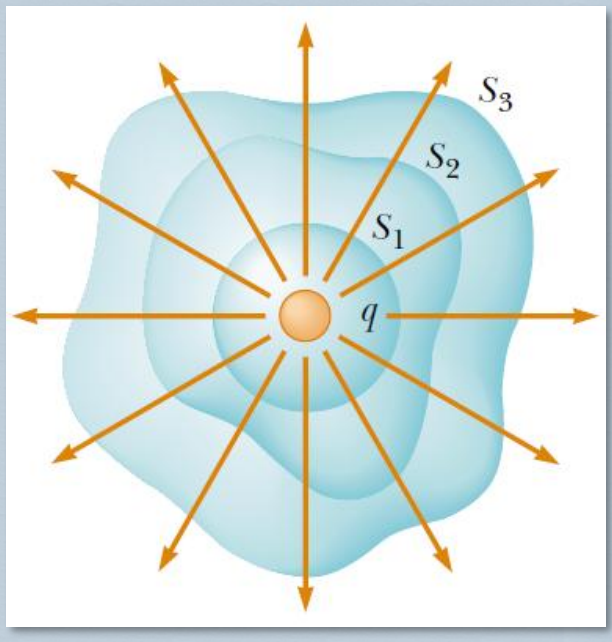
Ley de Gauss

El flujo del campo eléctrico a través de una superficie cerrada es proporcional a la magnitud de la fuente.

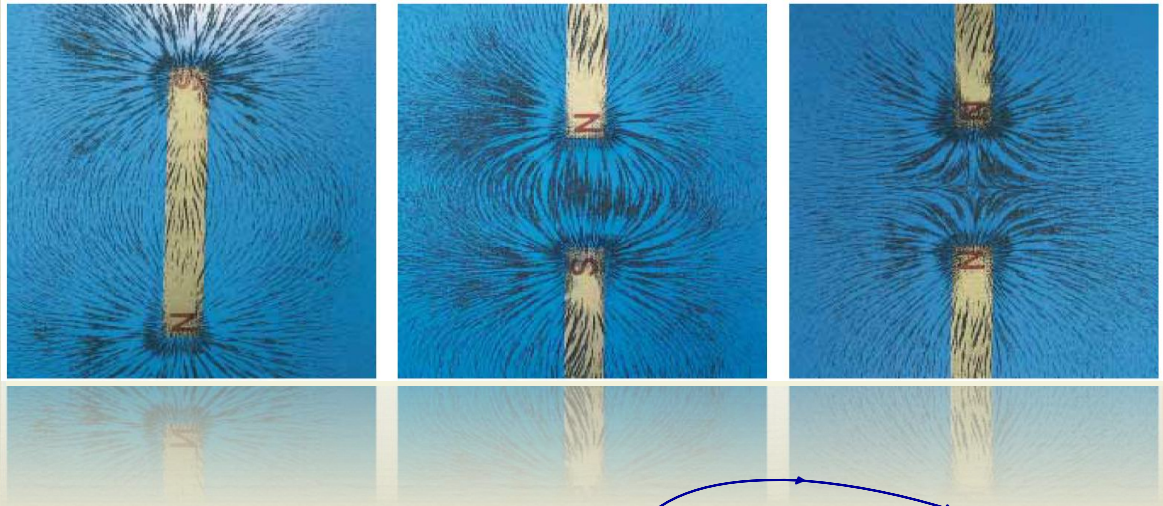
$$\oint_S \boldsymbol{E} \cdot d\boldsymbol{s} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

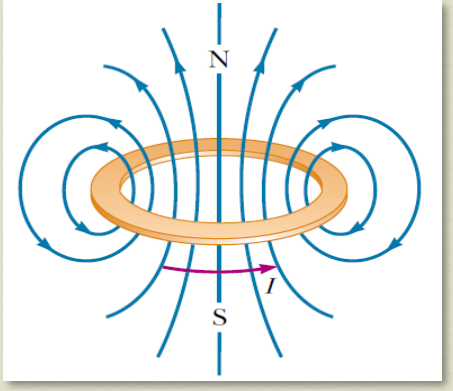
La permitividad eléctrica ϵ_0 es la constante de respuesta del medio al campo eléctrico.





Campo Magnético

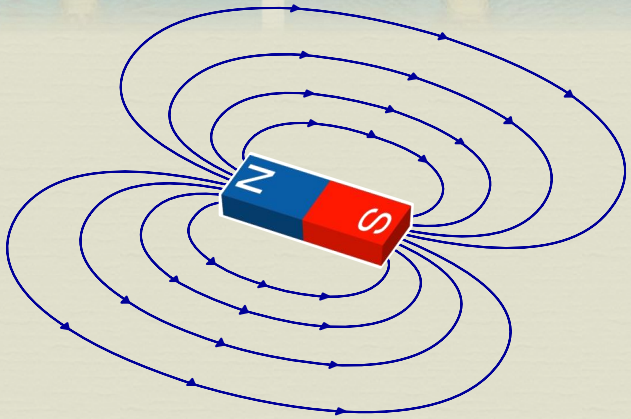


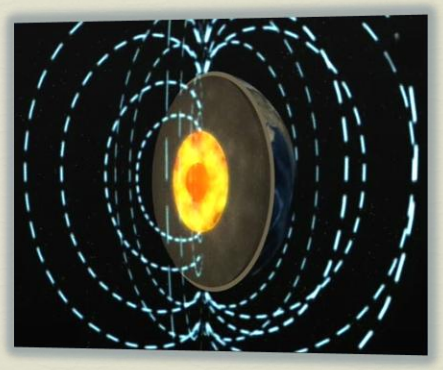


Una corriente de cargas eléctricas también genera un campo magnético.

Las líneas de fuerza del campo magnético son líneas cerradas:

van de norte a sur en los imanes.



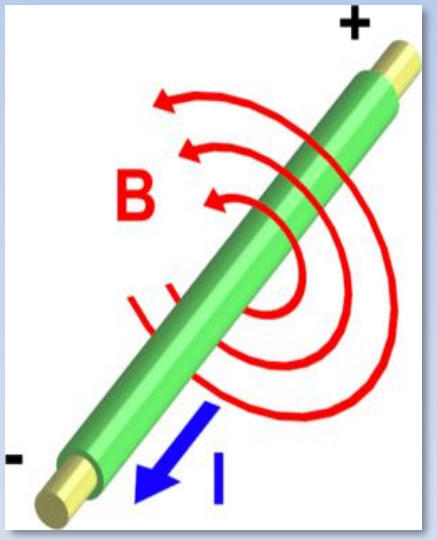


Campo Magnético de la Tierra

Es imposible separar los polos de un imán.

Ley de Ampere

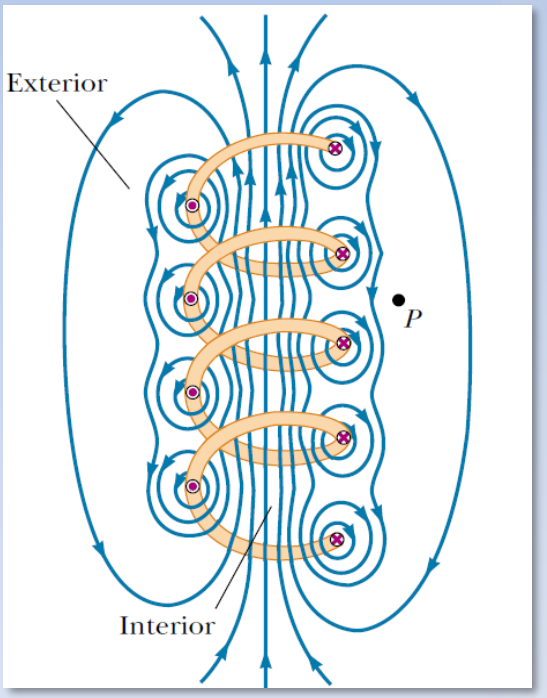
Una corriente eléctrica produce un campo magnético.



$$\oint_C \boldsymbol{B} \cdot d\boldsymbol{s} = \mu_0 \boldsymbol{I}$$

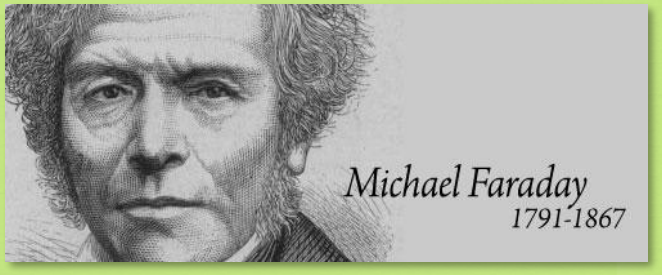
La permeabilidad magnética μ_0 depende del medio.

La intensidad del campo magnético en un contorno cerrado es proporcional a la corriente que lo produce.



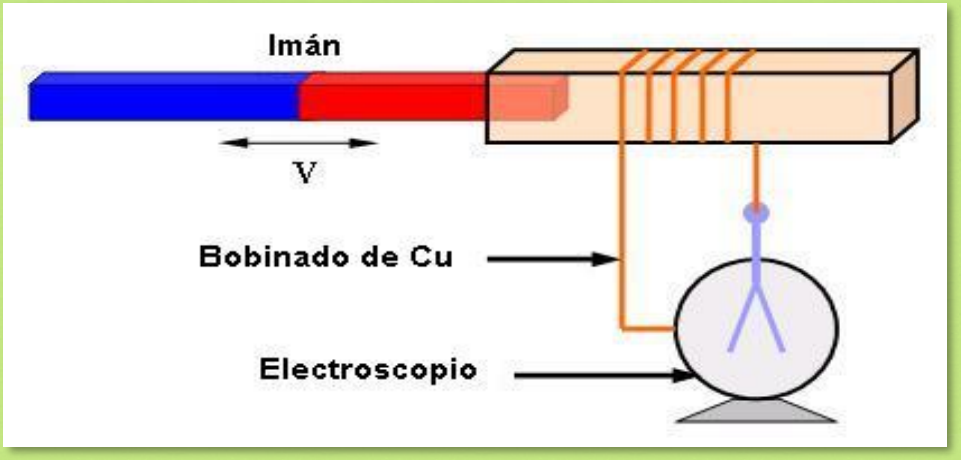
Campo magnético producido por una bobina o solenoide.
FUNDAMENTO DEL ELECTROIMÁN

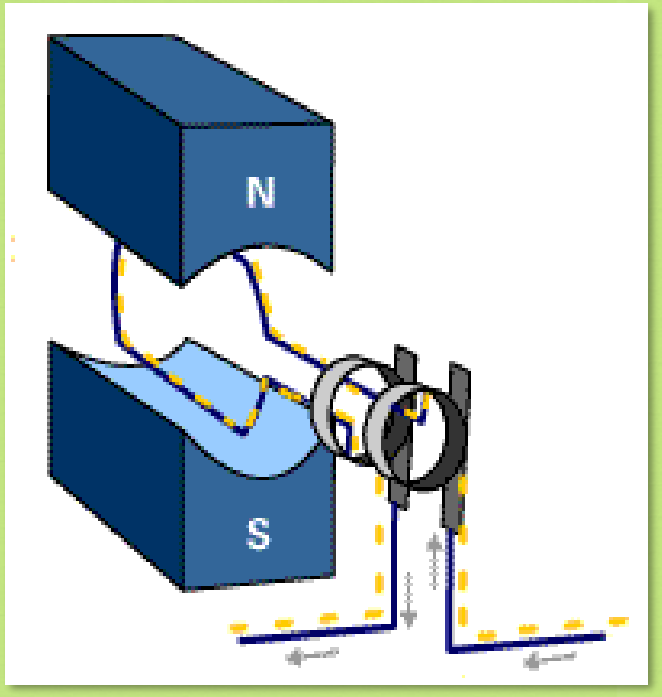
Ley de Inducción Electromagnética



El voltaje inducido en un circuito cerrado es proporcional a la rapidez con que cambia el flujo magnético.

$$\oint_C E \cdot dl = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$





La fuerza electromotriz (FEM) inducida es proporcional a la variación del flujo magnético.

Ecuaciones de Maxwell

Nombre	Forma diferencial	Forma integral
Ley de Gauss:	$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0}; \rho = \frac{Q}{V}$	$\oint_S E \cdot ds = \frac{Q}{\epsilon_0}$
Ley de Gauss para el campo magnético:	$\nabla \cdot B = 0$	$\oint_S B \cdot ds = 0$
Ley de Faraday:	$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$	$\oint_C E \cdot dl = -\frac{d}{dt}\oint_S B \cdot ds$
Ley de Ampere generalizada:	$\nabla \times B = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$	$\oint_C B \cdot dl = \mu_0 \oint_S J \cdot ds + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt}\oint_S E \cdot ds$

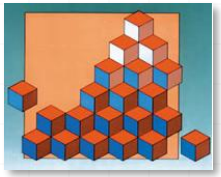
Donde, $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} C^2/J \cdot m;\ \mu_0 = 4\pi \times 10^7 N \cdot s^2/C^2.$

CURSO de
Electricidad y Magnetismo

FACULTAD de
INGENIERÍA

Campo Eléctrico

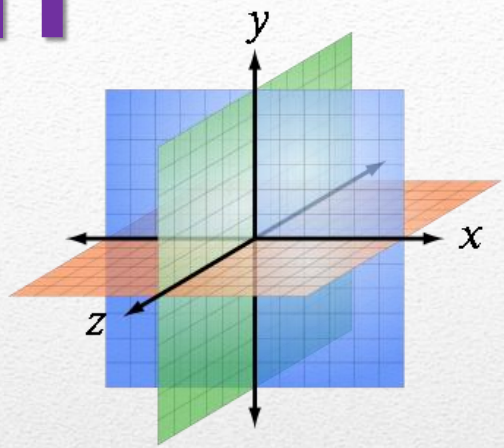
Objetivos de la Lección



Al terminar esta lección el alumno será capaz de:

- *Identificar las operaciones vectoriales básicas.*
- *Distinguir las características elementales de las Cargas Eléctricas.*
- *Listar los diferentes métodos de Electrización.*
- *Enunciar la Ley de Coulomb.*
- *Describir las el Concepto de Campo Eléctrico.*
- *Listar ejemplos del uso de Campo Eléctrico.*
- *Realizar la tarea correspondiente.*

Análisis Vectorial 1



Escalar: es una cantidad que está completamente caracterizada por su magnitud.

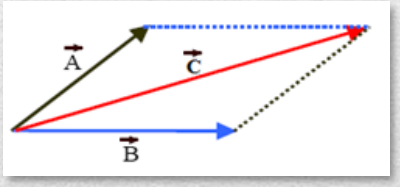
Vector: es una cantidad que está caracterizada por su magnitud y dirección. Usualmente se denota con el tipo de letra *negritas*; es decir, **A**, **B**, **C**, …, o bien, **a**, **b**, **c**, …

Un vector se especifica con sus componentes: $\boldsymbol{V} = (v_x, v_y, v_z)$

La magnitud del vector $\boldsymbol{V}$ es su longitud neta, es decir: $|\boldsymbol{V}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$

La suma de dos vectores se define de la siguiente manera: $\boldsymbol{C} = \boldsymbol{A} + \boldsymbol{B}$

De modo que, $c_x = a_x + b_x, \;\; c_y = a_y + b_y, \;\; c_z = a_z + b_z$



Regla del Paralelogramo

Para la operación resta, basta hacer el cambio de signo y observar que el vector resultante es el que corresponde a la diagonal menor en el paralelogramo.

Tanto la suma como la resta de vectores es asociativa: $\boldsymbol{A} \pm (\boldsymbol{B} \pm \boldsymbol{C}) = (\boldsymbol{A} \pm \boldsymbol{B}) \pm \boldsymbol{C} = \boldsymbol{A} + \boldsymbol{B} + \boldsymbol{C}$

Multiplicación de un vector por un escalar: Sea $c \in \mathbb{R}$, y $\boldsymbol{A} = (a_x, a_y, a_z)$ un vector, entonces:

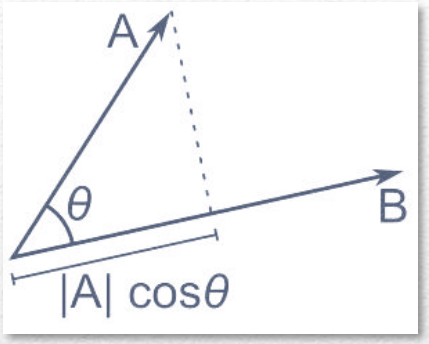
$$c\boldsymbol{A} = (ca_x, ca_y, ca_z)$$

Productos vectoriales

Producto Interno: también conocido como producto escalar o producto punto, es el resultado de sumar el producto de las componentes de dos vectores; es decir:

$$\boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{B} = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z = |\boldsymbol{A}||\boldsymbol{B}| \cos\theta$$

Donde θ es el ángulo entre los dos vectores.

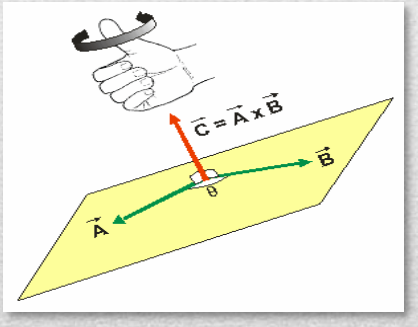


Producto Interior

Producto Exterior: también conocido como producto cruz, el resultado es un vector perpendicular a los vectores que se multiplican.

$$\boldsymbol{A} \times \boldsymbol{B} = \begin{vmatrix} \hat{\imath} & \hat{\jmath} & \hat{k} \\ a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \end{vmatrix}$$

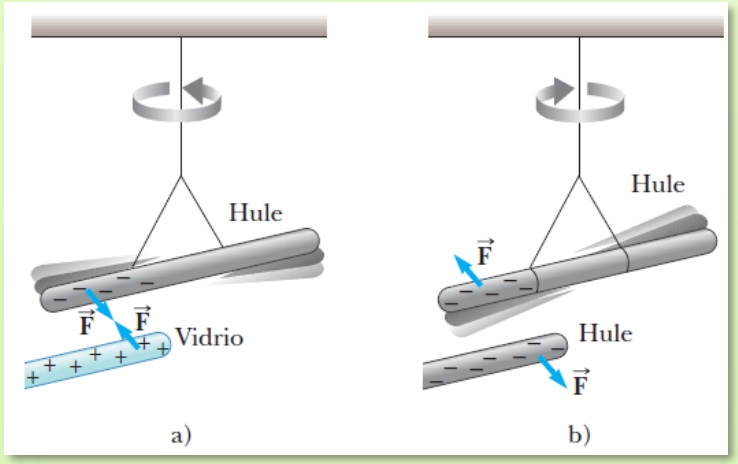
$$= (a_y b_z - a_z b_y)\hat{\imath} + (a_z b_x - a_x b_z)\hat{\jmath} + (a_x b_y - a_y b_x)\hat{k}$$



Producto Cruz

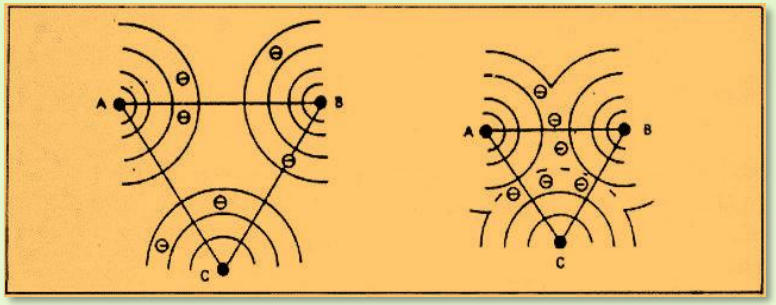
$$\|\boldsymbol{A} \times \boldsymbol{B}\| = |\boldsymbol{A}||\boldsymbol{B}| \, sen\, \alpha$$

La Carga Eléctrica

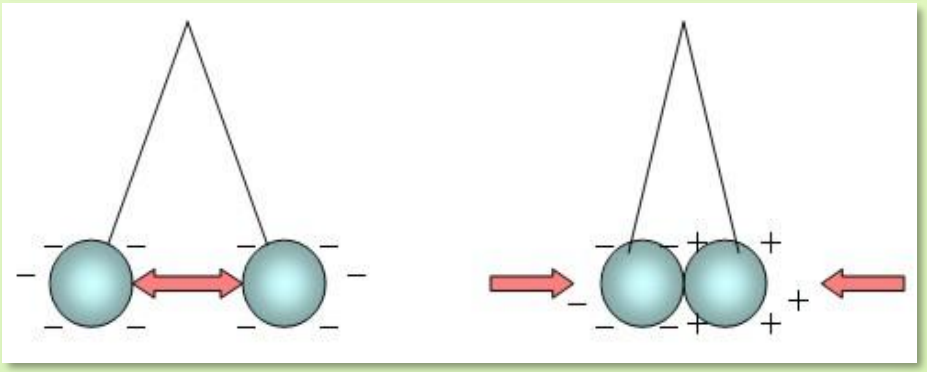


a) Una varilla de hule con carga negativa suspendida por en un hilo es atraída por una varilla de vidrio con carga positiva.

b) Una varilla de hule con carga negativa es repelida por otra varilla de hule con carga negativa.



Ley de las Cargas



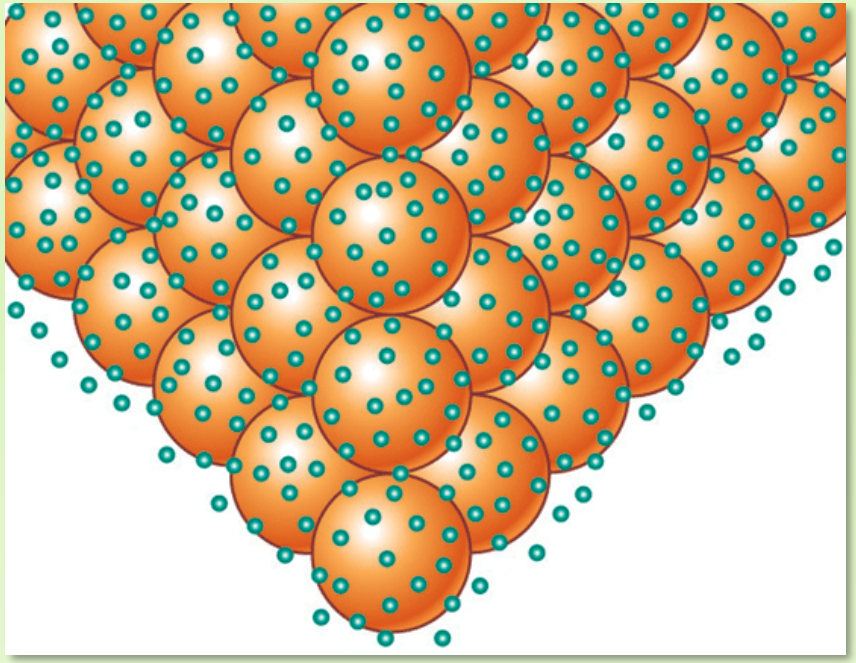
Materiales Electrificados

- *Conductores eléctricos: materiales con electrones que pueden moverse con libertad en el material.*
- *Aislantes eléctricos: materiales con los electrones unidos a átomos por lo que no pueden moverse libremente a través del material.*

La Carga Eléctrica en la Naturaleza

El rayo es una poderosa descarga electroestática producida por partículas positivas en la tierra y negativas en las nubes.

Estructura eléctrica de un metal



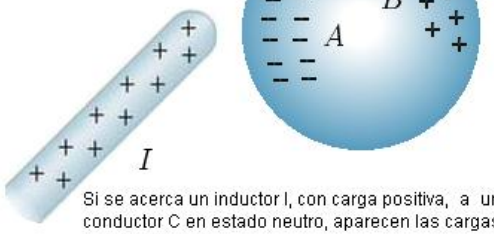
En los metales la nube electrónica se extiende fuera del material.

Electrización

Las formas de cargar un cuerpo pueden ser de tres tipos:

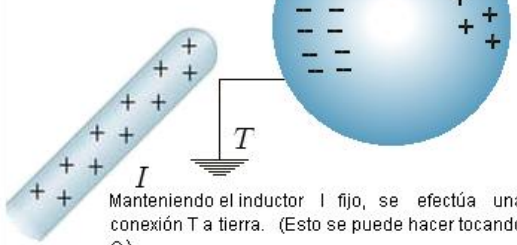
Carga eléctrica por Inducción

Fig.1



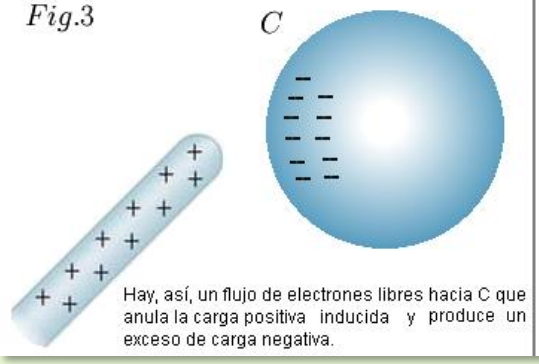
Si se acerca un inductor I, con carga positiva, a un conductor C en estado neutro, aparecen las cargas inducidas A y B.

Fig.2



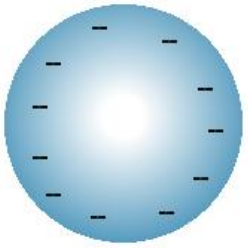
Manteniendo el inductor I fijo, se efectúa una conexión T a tierra. (Esto se puede hacer tocando C).

Fig.3



Hay, así, un flujo de electrones libres hacia C que anula la carga positiva inducida y produce un exceso de carga negativa.

Fig.4

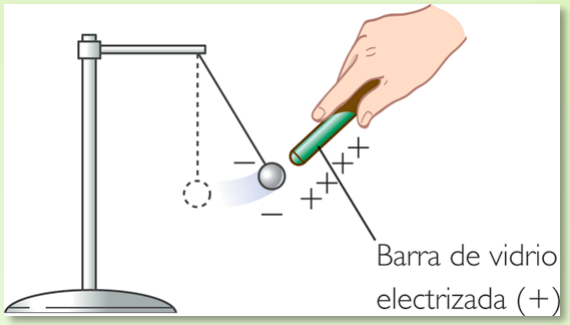


Al eliminar la conexión a tierra y retirar el inductor, el exceso de electrones se redistribuye por el cuerpo.

Por Fricción

Al frotar una varilla de vidrio con seda, se transfieren electrones del vidrio a la seda.

Carga por Contacto



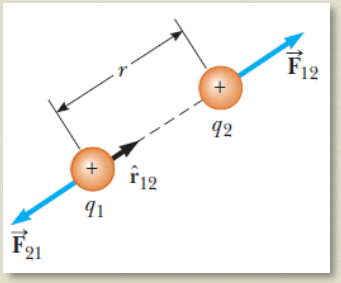
Experiencia del péndulo

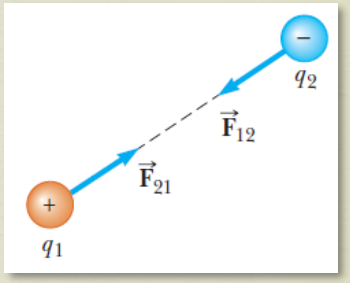
Ley de Coulomb

Balanza de torsión de Coulomb, utilizada para determinar la ley del cuadrado inverso para una fuerza eléctrica entre dos cargas.

Magnitud de la fuerza eléctrica entre dos cargas puntuales:

$$\vec{\mathbf{F}}_{12} = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}}_{12}$$





$$k_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

$$k_e = 8.987\,6 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2/C^2}$$

$$\epsilon_0 = 8.854\,2 \times 10^{-12}\mathrm{C^2/N \cdot m^2}$$

$$e = 1.602\,18 \times 10^{-19}\mathrm{C}$$

$$\vec{\mathbf{F}}_{21} = -\vec{\mathbf{F}}_{12}$$

$$\vec{\mathbf{F}}_1 = \vec{\mathbf{F}}_{21} + \vec{\mathbf{F}}_{31} + \vec{\mathbf{F}}_{41}$$

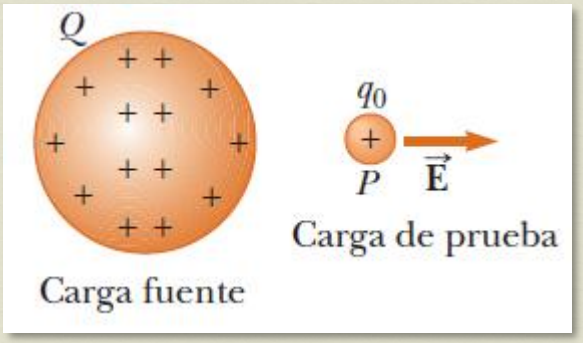
Carga y masa de electrones, protones y neutrones

Partícula	Carga (C)	Masa (kg)
Electrón (e)	$-1.602\,176\,5 \times 10^{-19}$	$9.109\,4 \times 10^{-31}$
Protón (p)	$+1.602\,176\,5 \times 10^{-19}$	$1.672\,62 \times 10^{-27}$
Neutrón (n)	0	$1.674\,93 \times 10^{-27}$

El Campo Eléctrico

Es la región del espacio cuyas propiedades han sido modificadas por la presencia de una distribución de carga eléctrica.

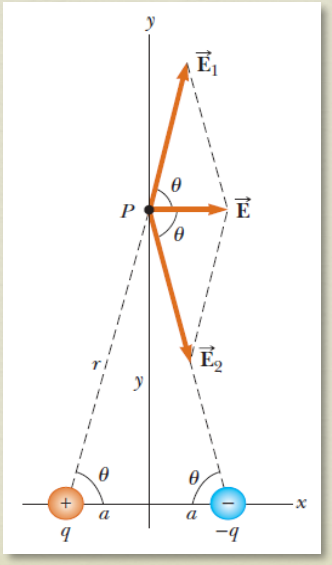
$$E = \frac{F}{q_0}$$



$$\vec{E} = k_e \sum_i \frac{q_i}{r_i^2} \hat{r}_i$$

Campo eléctrico debido a dos cargas:

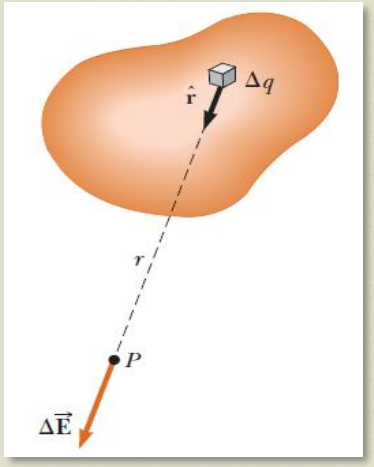
Las cargas q_1 y q_2 se ubican en el eje X, a distancias a y b, respectivamente, del origen:



Campo eléctrico de una distribución continua de carga

Con mucha frecuencia, en un grupo de cargas, la distancia existente entre ellas es mucho más reducida que la distancia entre el grupo y el punto donde se desea calcular el campo eléctrico.

En esta situación, el sistema de cargas se modela como si fuera continuo.



$$\vec{\mathbf{E}} = k_e \lim_{\Delta q_i \to 0} \sum_i \frac{\Delta q_i}{r_i^2} \hat{\mathbf{r}}_i = k_e \int \frac{dq}{r^2} \hat{\mathbf{r}}$$

- ***Si una carga Q tiene una distribución uniforme en un volumen V, la densidad de carga volumétrica ρ se define como:***

$$\rho \equiv \frac{Q}{V} \; [C/m^3]$$

- ***Si una carga Q tiene una distribución uniforme sobre una superficie de área A, la densidad de carga superficial σ (griega minúscula sigma) se define como:***

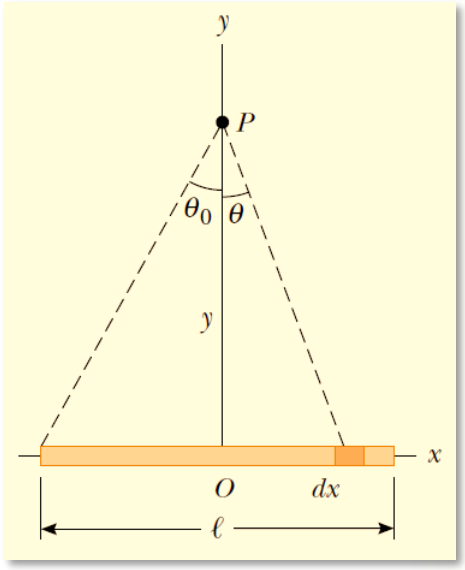
$$\sigma \equiv \frac{Q}{A} \; [C/m^2]$$

- ***Si una carga Q tiene una distribución uniforme a lo largo de una línea de longitud l, la densidad de carga lineal λ se define como:***

$$\lambda \equiv \frac{Q}{l} \; [C/m]$$

$$dq = \rho \; dV \qquad dq = \sigma \; dA \qquad dq = \lambda \; d\ell$$

Ejemplo 1:



Un alambre delgado de longitud l y carga uniforme por unidad de longitud λ descansa a lo largo del eje X, como se muestra en la figura.

Calcule el campo eléctrico en el punto P a una distancia y del alambre.

Solución: $\boldsymbol{E} = k_e \int \frac{dq}{r^2}\hat{\boldsymbol{r}}$ ***donde*** $\frac{dq}{r^2} = \frac{\lambda dx}{x^2+y^2}$

$$\Longrightarrow \qquad \boldsymbol{E} = \lambda k_e \int \frac{dx}{x^2+y^2}\,\hat{\boldsymbol{r}}$$

Pero las únicas componentes que permanecen son perpendiculares a la barra. $\Longrightarrow$ $\boldsymbol{E} = \boldsymbol{E_y} = 2\lambda k_e \int_{x=0}^{x=l/2} \cos\theta \frac{dx}{x^2+y^2}\hat{\boldsymbol{j}}$

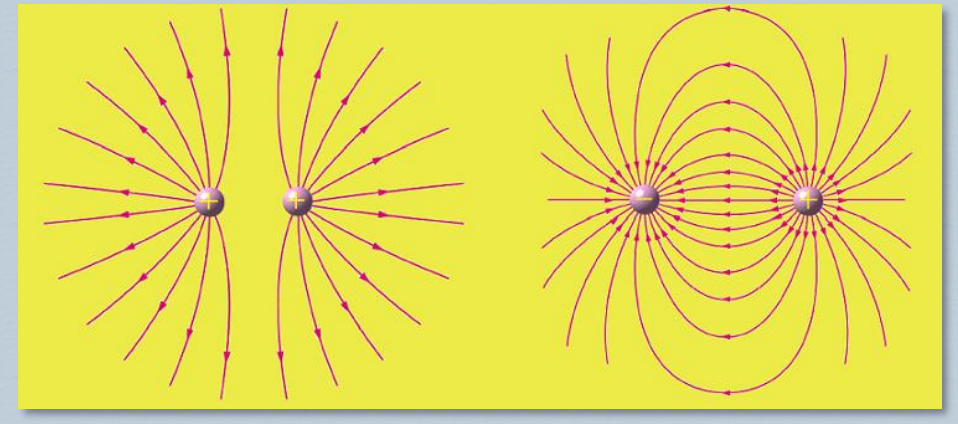
$$r = \frac{x}{sen\theta} = \frac{y}{cos\theta} \quad \Longrightarrow \quad x = y\,tan\theta \quad y \quad dx = y\,sec^2\theta\,d\theta$$

$$\int_{x=0}^{x=l/2} \cos\theta \frac{\lambda dx}{x^2+y^2} = \int_0^{\theta_0} \cos\theta \frac{y\,sec^2\theta\,d\theta}{y^2 tan^2\theta + y^2} \quad \Longrightarrow \quad = \frac{1}{y}\int_0^{\theta_0} \cos\theta \frac{sec^2\theta\,d\theta}{tan^2\theta + 1}$$

$$\boldsymbol{E} = \frac{2\lambda k_e}{y}\int_0^{\theta_0} cos\,\theta d\theta\,\hat{\boldsymbol{j}} \qquad \therefore \qquad \boldsymbol{E} = \frac{2\lambda k_e}{y} sen\theta_0\,\hat{\boldsymbol{j}} \quad \blacksquare$$

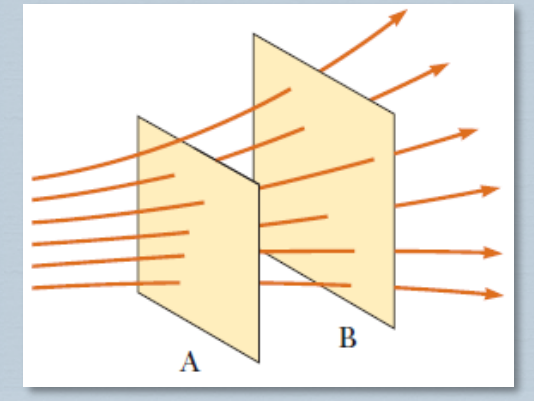
Líneas de Campo Eléctrico

- **El vector E del campo eléctrico es tangente a la línea del campo eléctrico en cada punto.**



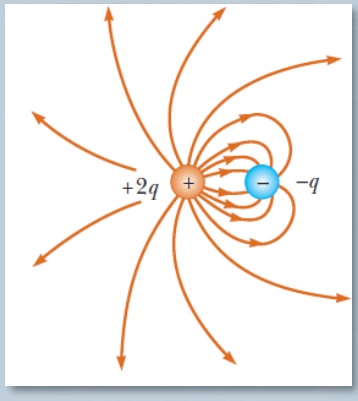
- El número de líneas dibujadas que salen de una carga positiva o se acercan a una carga negativa será proporcional a la magnitud de dicha carga.
- Dos líneas de campo no se pueden cruzar.

- **El número de líneas por unidad de área es proporcional a la magnitud del campo eléctrico.**



- El número de líneas de campo es Cq donde C es una constante de proporcionalidad arbitraria.
- La magnitud del campo es mayor en la superficie A que en la B.

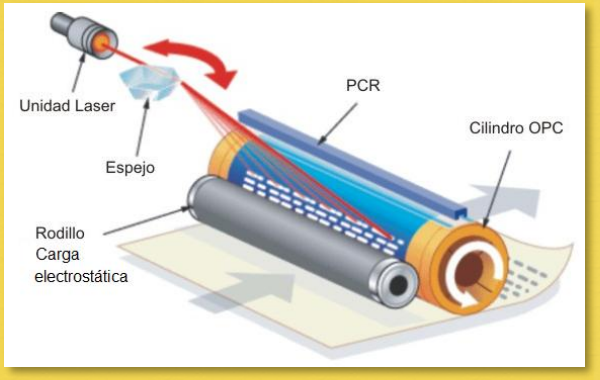
Líneas de campo eléctrico para una carga puntual $2q$ y una segunda carga puntual q. Observe que dos líneas salen de $2q$ por cada una que termina en q.



Movimiento de partículas cargadas en un campo eléctrico uniforme

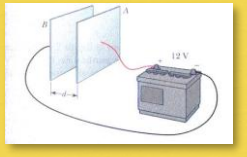
Cuando una partícula con carga q y masa m se coloca en un campo eléctrico $\boldsymbol{E}$ la fuerza eléctrica ejercida sobre la carga es $q\boldsymbol{E}$:

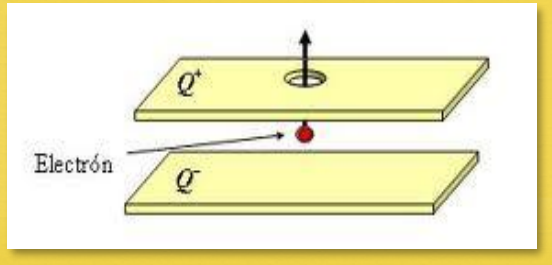
$$\boldsymbol{F_e = qE = ma} \qquad \Rightarrow \qquad \boldsymbol{a = \frac{qE}{m}}$$

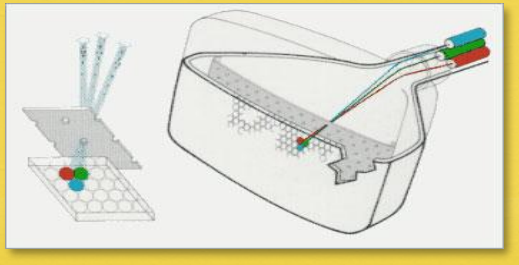


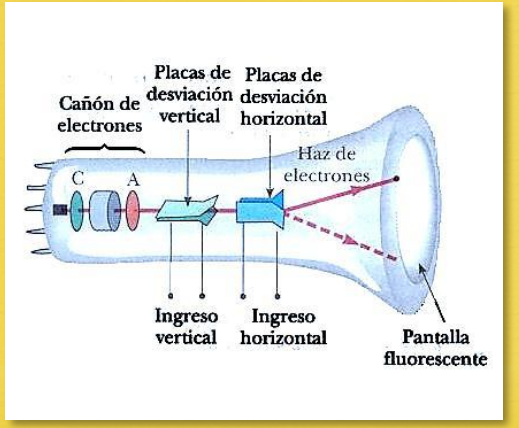
Si $\boldsymbol{E}$ es uniforme (constante en magnitud y dirección), la fuerza eléctrica sobre la partícula es constante y se puede aplicar el modelo de partícula bajo aceleración constante.

Cañón de Electrones





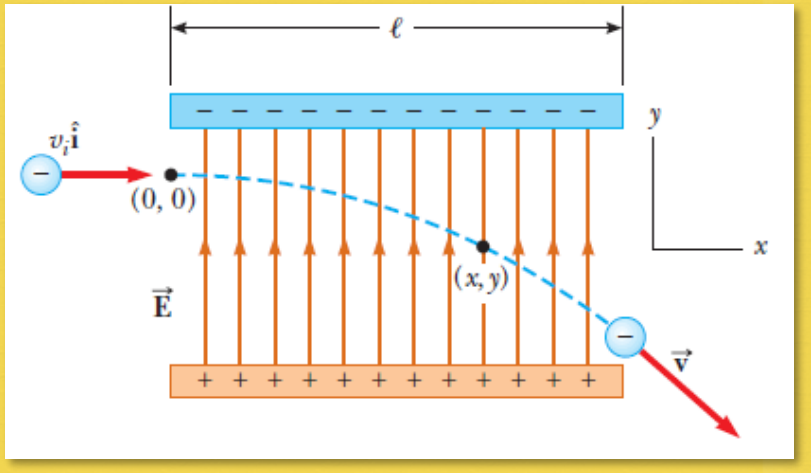




Ejemplo 2:

Un electrón acelerado:

Un electrón entra a la región de un campo eléctrico de magnitud uniforme de magnitud $E = 200\ N/C$, como se muestra en la figura, con velocidad inicial $v_i = 3.00 \times 10^6\ m/s$. La longitud horizontal de las placas es $l = 0.100\ m$.



A) Encuentre la aceleración del electrón mientras está en el campo eléctrico.

$$\Rightarrow \quad \boldsymbol{a_y = \frac{F_y}{m} = -\frac{eE}{m_e}\hat{j} = -\frac{(1.6\times10^{-19}C)(200\ N/C)}{9.11\times10^{-31}\ kg}\hat{j} = -3.51 \times 10^{13} m/s^2 \hat{j}}$$

B) Si supone que el electrón entra al campo en el tiempo $t_0 = 0$, encuentre el tiempo cuando deja el campo.

$$\Rightarrow \quad t - t_0 = \frac{l}{v_i} = \frac{0.100\ m}{3.00\times10^6\ m/s} = 3.33 \times 10^{-8}\ s$$

C) Si la posición vertical del electrón al entrar al campo es $y_i = 0$, ¿cuál es la posición vertical cuando sale del campo?.

$$\Rightarrow \quad y_f = y_i + v_{yi}t + \frac{1}{2}a_y t^2 = 0 + 0 + \frac{1}{2}(-3.51 \times 10^{13} m/s^2)(3.33 \times 10^{-8}\ s\ )^2$$

$$y_f = -0.0195\ m = -1.95\ cm$$

Resumen

DEFINICIONES

El **campo eléctrico** $\vec{\mathbf{E}}$ en algún punto del espacio se define como la fuerza eléctrica $\vec{\mathbf{F}}_e$ que actúa sobre una pequeña carga de prueba positiva colocada en dicho punto, dividida entre la magnitud q_0 de la carga de prueba:

$$\vec{\mathbf{E}} \equiv \frac{\vec{\mathbf{F}}_e}{q_0}$$

CONCEPTOS Y PRINCIPIOS

Las **cargas eléctricas** tienen las siguientes propiedades:

- Cargas de signos opuestos se atraen, y cargas del mismo signo se repelen.
- La carga total en un sistema aislado se conserva.
- La carga está cuantizada.

Los **conductores** son materiales donde los electrones se mueven libremente. Los **aisladores** son materiales donde los electrones no se mueven con libertad.

La **ley de Coulomb** afirma que la fuerza eléctrica que ejerce una carga puntual q_1 sobre una segunda carga puntual q_2 es

$$\vec{\mathbf{F}}_{12} = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}}_{12}$$

donde r es la distancia entre las dos cargas y $\hat{\mathbf{r}}_{12}$ es un vector unitario dirigido de q_1 hacia q_2. La constante k_e, que se llama **constante de Coulomb**, tiene el valor $k_e = 8.99 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2/C^2}$.

La fuerza eléctrica sobre una carga q en un campo eléctrico $\vec{\mathbf{E}}$ es

$$\vec{\mathbf{F}}_e = q\vec{\mathbf{E}}$$

A una distancia r de una carga puntual q, el campo eléctrico generado por la carga es

$$\vec{\mathbf{E}} = k_e \frac{q}{r^2} \hat{\mathbf{r}}$$

donde $\hat{\mathbf{r}}$ es un vector unitario dirigido desde la carga hacia el punto en cuestión. El campo eléctrico se dirige radialmente hacia afuera desde una carga positiva y radialmente hacia adentro hacia una carga negativa.

El campo eléctrico generado por un grupo de cargas puntuales se puede calcular al usar el principio de sobreposición: el campo eléctrico total en algún punto es igual a la suma vectorial de los campos eléctricos de todas las cargas:

$$\vec{\mathbf{E}} = k_e \sum_i \frac{q_i}{r_i^2} \hat{\mathbf{r}}_i$$

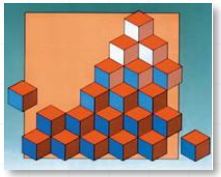
El campo eléctrico en algún punto generado por una distribución de carga continua es

$$\vec{\mathbf{E}} = k_e \int \frac{dq}{r^2} \hat{\mathbf{r}}$$

donde dq es la carga en un elemento de la distribución de carga y r es la distancia desde el elemento hasta el punto en cuestión.

Ley de Gauss

Objetivos de la Lección



Al terminar esta lección el alumno será capaz de:

- *Identificar la diferencia entre un campo escalar y un campo vectorial.*
- *Distinguir los operadores diferenciales: Divergencia y Rotacional.*
- *Enunciar la Ley de Gauss.*
- *Explicar la importancia de la ley de Gauss.*
- *Resolver problemas relacionados con el cálculo del campo eléctrico en sistemas con carga simétricos.*
- *Realizar la tarea correspondiente.*

Análisis Vectorial 2

Campos vectoriales y escalares

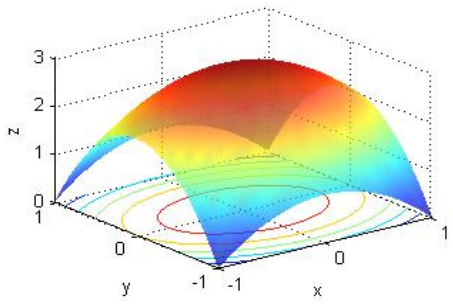
Definiciones:

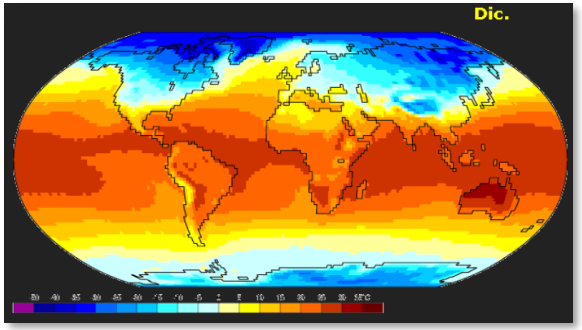
- Un *campo escalar* en el espacio es una aplicación $\boldsymbol{F}: \boldsymbol{A} \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R};\ n = 2,3.$

  Asigna a cada punto (x, y, z) de su dominio $\boldsymbol{A}$ un escalar $F(x, y, z) = z.$

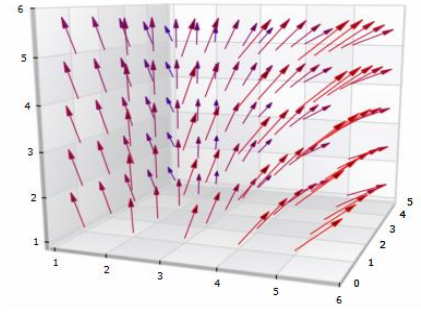
- Un *campo vectorial* en el espacio $\mathbb{R}^3$ es una aplicación $\boldsymbol{F}: \boldsymbol{A} \subset \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3.$

  Asigna a cada punto (x, y, z) de su dominio $\boldsymbol{A}$ un vector $\boldsymbol{F}(x, y, z) = (f_x, f_z, f_z).$





Campos Escalares de Temperatura en 2D y 3D



Campo Vectorial 3D

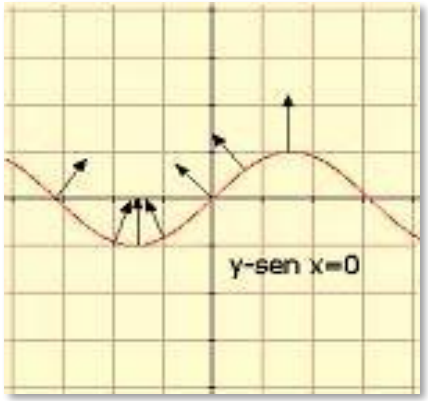
Operadores Diferenciales

Gradiente de un campo escalar, derivada direccional

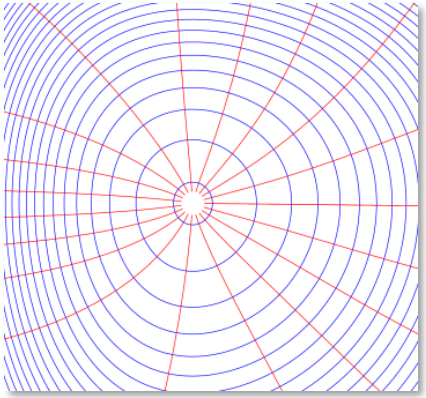
Definición: Si $f: U \subset \mathbb{R}^3 \to \mathbb{R}$ es diferenciable, el *gradiente* de f en (x, y, z) es el vector del espacio dado por:

$$\nabla f = \left(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, \frac{\partial f}{\partial z} \right)$$

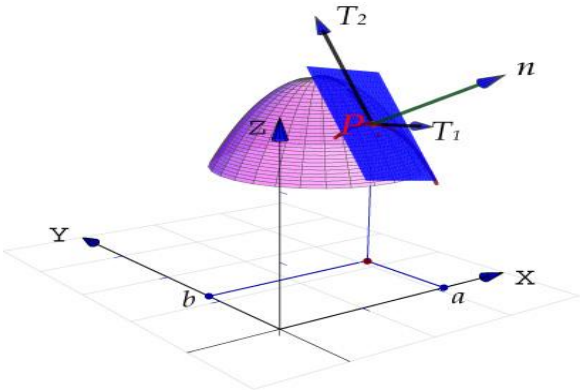
El gradiente es un vector que se encuentra normal (perpendicular) a la tangente de la función en cada punto e indica la dirección en la cual el campo varía más rápidamente.



El gradiente es normal a la curva de nivel.



Función gradiente de un campo central.



Gradiente de una función escalar.

Operadores Diferenciales

Divergencia de un Campo Vectorial

Definición: Si $\boldsymbol{F} = (F_1, F_2, F_3)$ es un campo vectorial en $\mathbb{R}^3$ su divergencia es:

$$\boldsymbol{Div\ F} = \nabla \cdot \boldsymbol{F} = \sum_{i=1}^{3} \frac{\partial F_i}{\partial x_i}$$

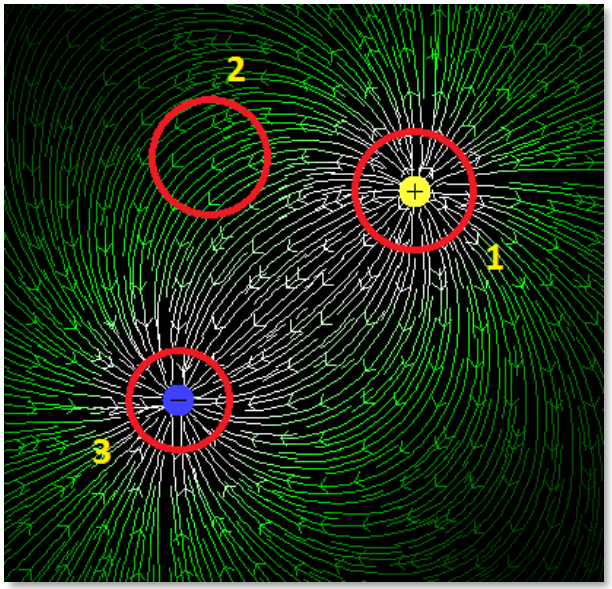
La divergencia de un campo vectorial mide la diferencia entre el flujo entrante y el flujo saliente de un campo vectorial sobre la superficie que rodea a un volumen de control.

Si el campo tiene "fuentes" $\boldsymbol{Div\ F > 0}$

y si tiene "sumideros" $\boldsymbol{Div\ F < 0}$.

1. **Flujo saliente.**
2. $\boldsymbol{Div\ F = 0}$
3. **Flujo entrante.**

Líneas de Campo Eléctrico

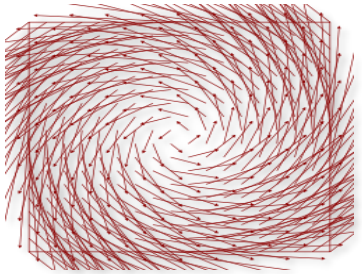


Operadores Diferenciales

Rotacional de un Campo Vectorial

Definición: Si $\boldsymbol{F} = (F_x, F_y, F_z)$ entonces su rotacional es el campo vectorial:

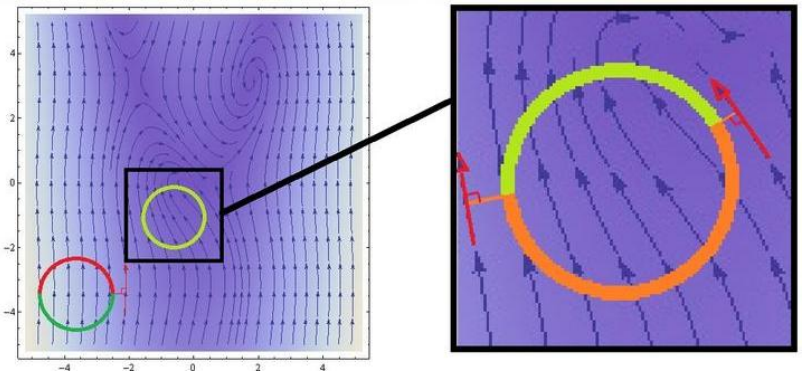
$$\nabla \times \boldsymbol{F} = \begin{vmatrix} \boldsymbol{i} & \boldsymbol{j} & \boldsymbol{k} \\ \dfrac{\partial}{\partial x} & \dfrac{\partial}{\partial y} & \dfrac{\partial}{\partial z} \\ F_x & F_y & F_z \end{vmatrix}$$

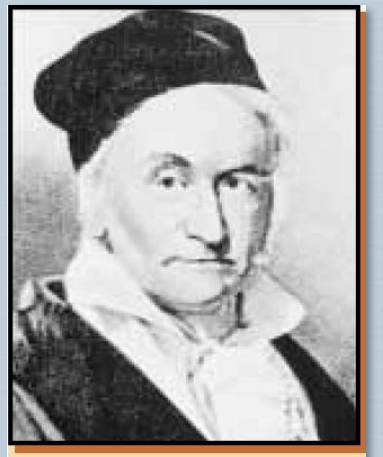


Este operador vectorial muestra la tendencia de un campo vectorial (usualmente representativo de un fluido) a inducir rotación alrededor de un punto.

La dirección de rotación estará dada por la *regla de la mano derecha*.

Si su valor es igual a cero en un punto significa que está libre de rotaciones en ese punto.





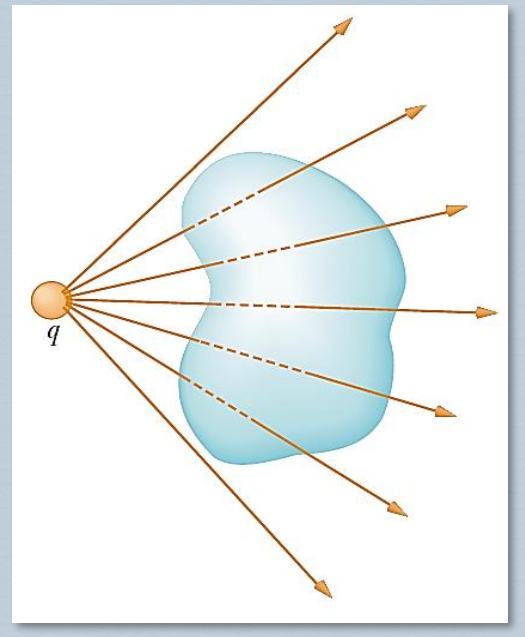
Karl Friedrich Gauss
(1777 – 1855)

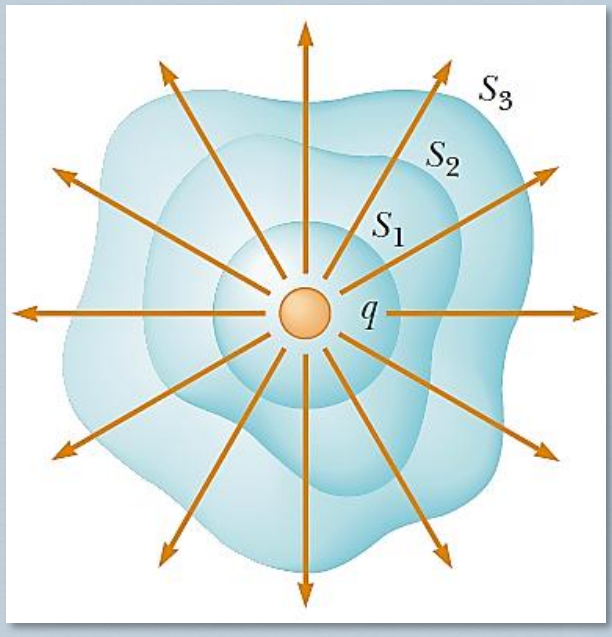
Ley de Gauss

El flujo del campo eléctrico a través de una superficie cerrada es proporcional a la magnitud de la fuente.

$$\oint_S \boldsymbol{E} \cdot d\boldsymbol{s} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

La permitividad eléctrica ϵ_0 es la constante de respuesta del medio al campo eléctrico.





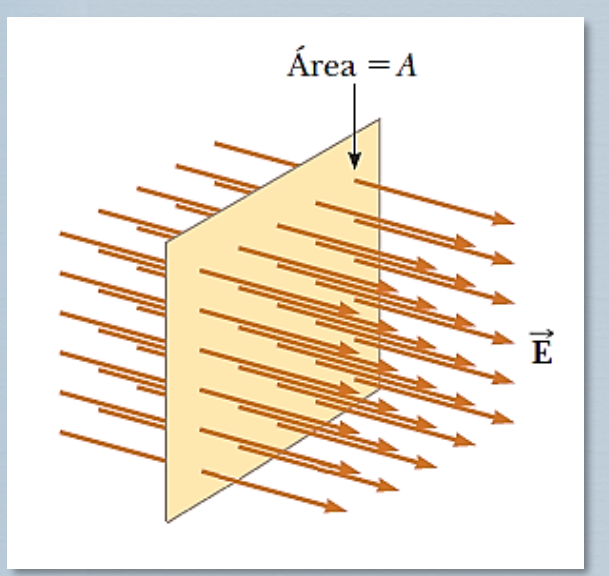
La Ley de Gauss es útil para calcular los campos eléctricos de distribuciones de carga simétricas.

Flujo Eléctrico

El flujo eléctrico es proporcional al número de las líneas de campo eléctrico que penetran en una superficie.

El número de líneas por unidad de área (la densidad de líneas) es proporcional a la magnitud del campo eléctrico.

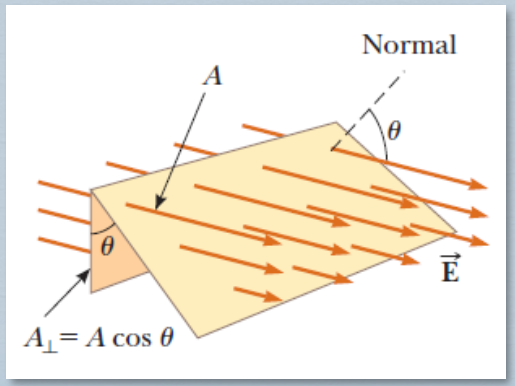
$$\Phi_E = EA\ [N \cdot m^2/C]$$



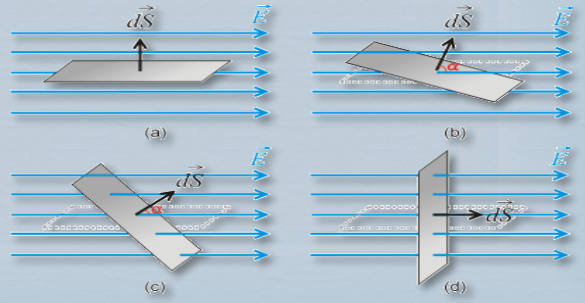
El flujo eléctrico Φ_E que cruza esta superficie es igual a EA.

Si la superficie no es perpendicular al campo, el número de líneas de campo eléctrico que atraviesan el área A es igual al número que atraviesa el área $A_\perp$.

$$\Phi_E = EA_\perp = EA\cos\theta$$

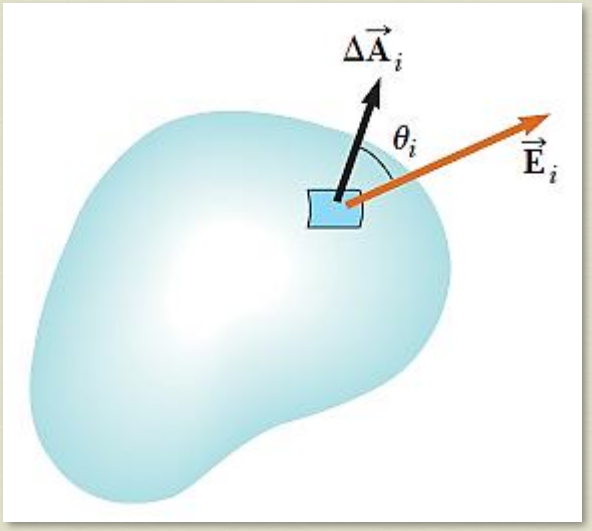


El flujo que atraviesa una superficie de área A fija tiene un valor máximo EA cuando la superficie es perpendicular al campo y es cero si la superficie es paralela al campo.



Flujo Eléctrico

Si el campo eléctrico varía a lo largo de una superficie, la definición de flujo aplica sólo para un elemento de área pequeño sobre el cual el campo sea casi constante.



$$\Delta\Phi_E = E_i\,\Delta A_i \cos\theta_i = \vec{E}_i \cdot \Delta\vec{A}_i$$

Usando la definición de producto escalar de dos vectores.

Al sumar las contribuciones de todos los elementos, obtiene el flujo total a través de la superficie.

$$\Phi_E \approx \sum \vec{E}_i \cdot \Delta\vec{A}_i$$

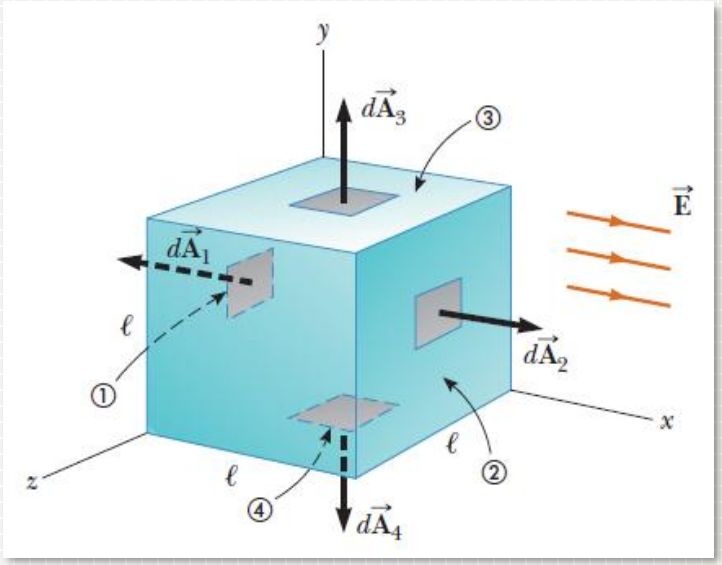
En el límite cuando el área de cada elemento se acerca a cero, el número de elementos se acercaría al infinito y la suma se reemplaza por una integral.

$$\Phi_E \equiv \int_{\text{superficie}} \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

Flujo a través de un cubo

Considere un campo eléctrico uniforme ***E*** orientado en la dirección *X* en el espacio vacío.

Encuentre el flujo eléctrico neto a través de la superficie de un cubo con arista *l*.



$$\Phi_E = \int_1 \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{A}} + \int_2 \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{A}}$$

$$\int_1 \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{A}} = \int_1 E(\cos 180°)\, dA = -E \int_1 dA = -EA = -E\ell^2$$

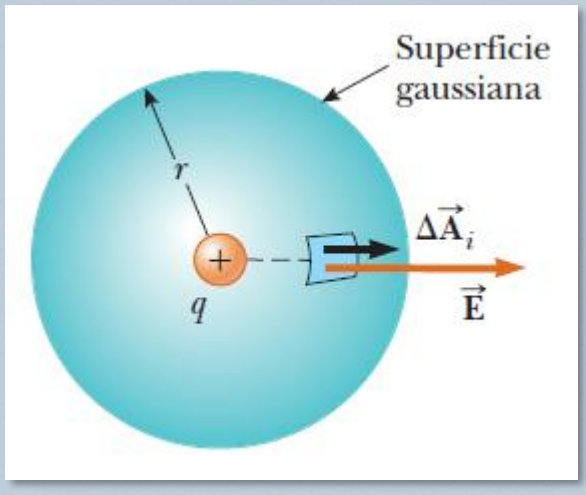
$$\int_2 \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{A}} = \int_2 E(\cos 0°)\, dA = E \int_2 dA = +EA = E\ell^2$$

Las líneas de campo eléctrico pasan perpendiculares a través de dos caras y son paralelas a las cuatro caras restantes del cubo.

$$\Phi_E = -E\ell^2 + E\ell^2 + 0 + 0 + 0 + 0 = 0$$

Ley de Gauss

Relaciona el flujo a través de una superficie con la carga encerrada.



La magnitud del campo eléctrico en todos los puntos de la superficie de la esfera es:

$$E = k_e q / r^2$$

$$\vec{E} \cdot \Delta\vec{A}_i = E\,\Delta A_i \quad \Rightarrow$$

El flujo neto a través de la superficie es igual a:

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \oint E\,dA = E \oint dA$$

$$\Phi_E = k_e \frac{q}{r^2}(4\pi r^2) = 4\pi k_e q = \frac{q}{\epsilon_0}$$

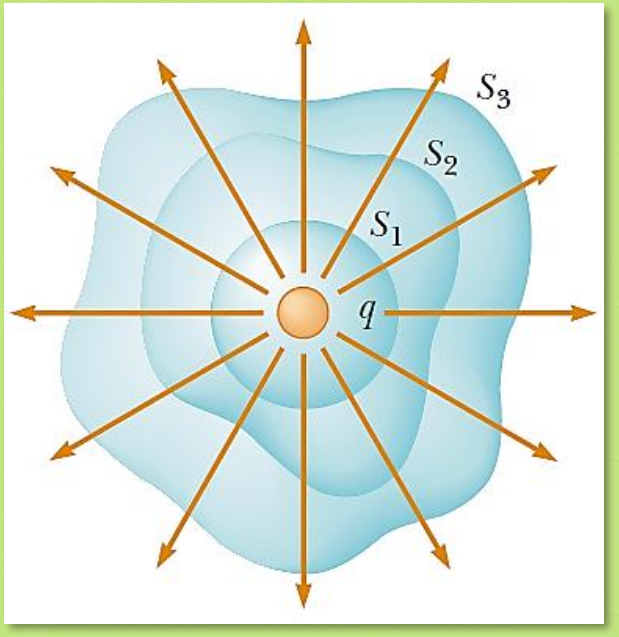
Las líneas de campo están dirigidas radialmente hacia afuera y por tanto son normales o perpendiculares a la superficie en todos sus puntos.

El flujo neto a través de la superficie esférica es proporcional a la carga existente en el interior.

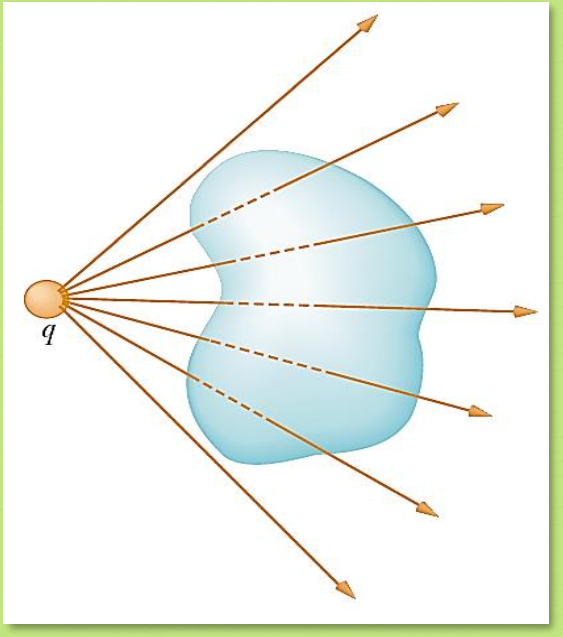
Flujo neto a través de una superficie

El flujo neto a través de *cualquier* superficie cerrada que rodea a una carga puntual *q* tiene un valor que es independiente de la forma de la superficie:

$$= \frac{q}{\epsilon_0}$$



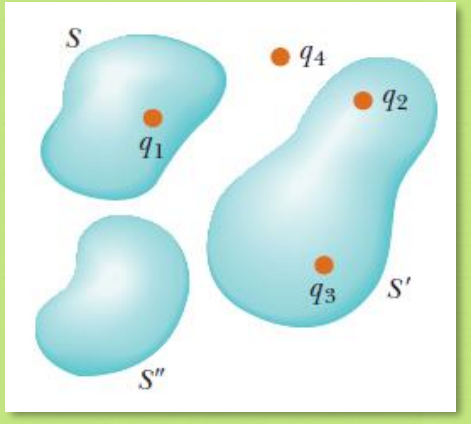
**Superficies cerradas de diversas formas que rodean una carga *q*.
El flujo eléctrico neto es el mismo a través de todas las superficies.**



Carga puntual localizada fuera de una superficie cerrada. El número de líneas que entran a la superficie es igual al número de líneas que salen de la misma.

Ley de Gauss

$$\Phi_E = \oint \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{A}} = \frac{q_{\text{in}}}{\epsilon_0}$$



$$\oint \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{A}} = \oint (\vec{\mathbf{E}}_1 + \vec{\mathbf{E}}_2 + \cdots) \cdot d\vec{\mathbf{A}}$$

Plano de carga

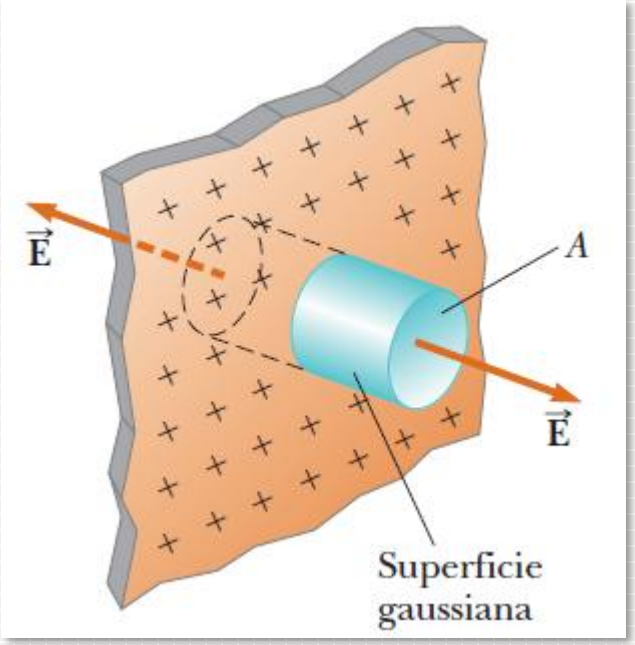
Encuentre el campo eléctrico debido a un plano infinito de carga positiva con densidad de carga superficial uniforme σ.

$$\Phi_E = 2EA = \frac{q_{\text{in}}}{\epsilon_0} = \frac{\sigma A}{\epsilon_0}$$

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

Ya que la distancia desde cada extremo plano del cilindro al plano no aparece en la ecuación, se concluye que $E = \sigma / 2\epsilon_0$ está a cualquier distancia desde el plano.

Es decir: *el campo es uniforme en todas partes.*



Superficie gaussiana cilíndrica que penetra un plano infinito de carga.

El flujo de a través de cada extremo de la superficie gaussiana es EA.

A través de la superficie curva es cero.

Conductores en equilibrio electrostático

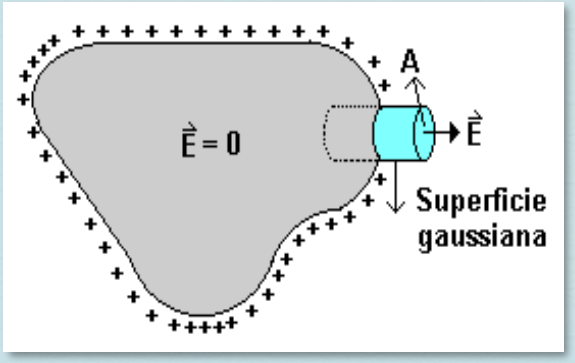
Un conductor en equilibrio electrostático tiene las siguientes propiedades:

1. En el interior del conductor el campo eléctrico es cero (siendo sólido o hueco).

2. Si el conductor tiene carga, ésta reside en su superficie.

3. El campo eléctrico fuera del conductor cargado es perpendicular a la superficie y tiene una magnitud $\boldsymbol{\sigma/\in_0}$, con σ la densidad de carga superficial en ese punto.

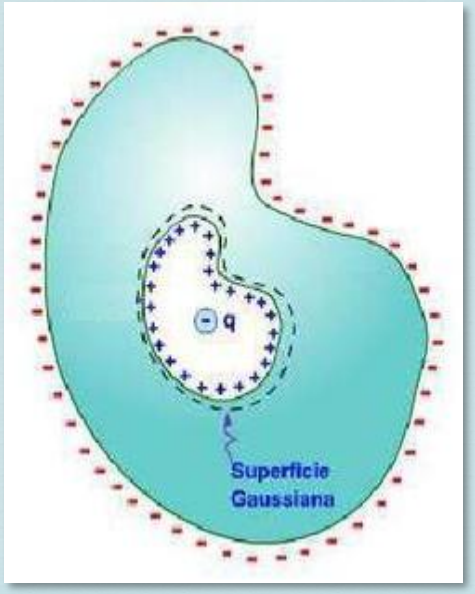
4. En un conductor de forma irregular, la densidad de carga superficial es máxima en aquellos puntos donde el radio de curvatura es menor.



Campo eléctrico justo afuera de un conductor con carga

$$\Phi_E = \oint E\,dA = EA = \frac{q_{\text{in}}}{\epsilon_0} = \frac{\sigma A}{\epsilon_0}$$

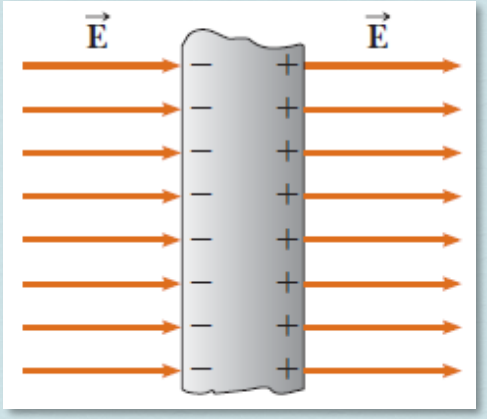
$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$



Conductores en equilibrio electrostático

Placa conductora en un campo eléctrico externo $\boldsymbol{E}$:

- *Al aplicar el campo externo, los electrones libres se aceleran hacia la izquierda.*
- *El movimiento de los electrones hacia la izquierda causa un plano de carga positiva en la superficie derecha.*
- *Los planos de carga crean un campo eléctrico interior que se opone al campo externo hasta igualar su magnitud,*
- *Como resultado, el campo eléctrico es cero en el interior del conductor.*



El tiempo que necesita un buen conductor para alcanzar el equilibrio es del orden de 110^{-16} *s.*

Resumen

DEFINICIONES

El flujo eléctrico es proporcional al número de líneas de campo eléctrico que penetran una superficie. Si el campo eléctrico es uniforme y forma un ángulo θ con la normal a una superficie de área A, el flujo eléctrico a través de la superficie es

$$\Phi_E = EA \cos \theta$$

En general, el flujo eléctrico a través de una superficie es

$$\Phi_E \equiv \int_{\text{superficie}} \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{A}}$$

CONCEPTOS Y PRINCIPIOS

La **ley de Gauss** dice que el flujo eléctrico neto Φ_E a través de cualquier superficie gaussiana cerrada es igual a la carga *neta* q_{in} dentro de la superficie, dividida por ϵ_0:

$$\Phi_E = \oint \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{A}} = \frac{q_{\text{in}}}{\epsilon_0}$$

Al usar la ley de Gauss, se puede calcular el campo eléctrico debido a varias distribuciones de carga simétricas.

Un conductor en **equilibrio electrostático** tiene las siguientes propiedades:

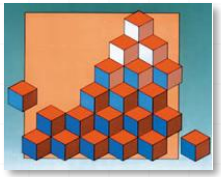
1. El campo eléctrico es cero en todas partes dentro del conductor, ya sea que el conductor sea sólido o hueco.
2. Si un conductor aislado tiene una carga, la carga reside en su superficie.
3. El campo eléctrico justo afuera de un conductor con carga es perpendicular a la superficie del conductor y tiene una magnitud σ / ϵ_0, donde σ es la densidad de carga superficial en dicho punto.
4. En un conductor con forma irregular, la densidad de carga superficial es mayor en posiciones donde el radio de curvatura de la superficie es más pequeño.

CURSO de
Electricidad y Magnetismo

FACULTAD de
INGENIERÍA

Potencial Eléctrico

Objetivos de la Lección



Al terminar esta lección el alumno será capaz de:

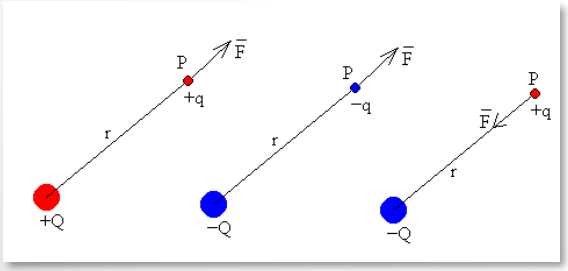
- *Enunciar la diferencia entre energía potencial eléctrica y potencial eléctrico.*
- *Identificar el potencial eléctrico asociado a un conjunto de cargas eléctricas.*
- *Calcular el campo eléctrico en función del potencial eléctrico.*
- *Explicar el experimento de Millikan.*
- *Resolver problemas relacionados.*

Energía Potencial

Ya que la fuerza electrostática es conservativa, los fenómenos de esta clase pueden describirse mediante una energía potencial eléctrica.

De manera similar al campo gravitacional, el trabajo realizado sobre una carga que se mueve en un campo eléctrico es igual a la energía potencial del sistema.

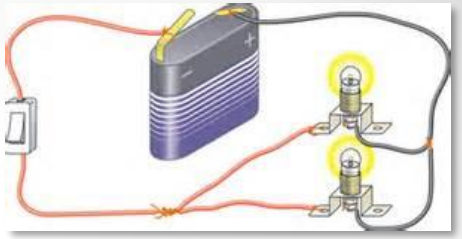
$$W_{AB} = U_B - U_B = -q_0 \int_A^B \boldsymbol{E} \cdot d\boldsymbol{s}$$



La integral no depende de la trayectoria, solo de los puntos extremos, y el resultado es un escalar.

El concepto de potencial eléctrico tiene gran valor práctico en la operación de circuitos eléctricos.

Potencial Eléctrico



Al dividir la energía potencial entre la carga de prueba se obtiene una cantidad física que depende sólo de la distribución de carga fuente y tiene un valor en cada uno de los puntos de un campo eléctrico.

$$V = \frac{U}{q_0}$$

$$1\,\mathrm{V} \equiv 1\,\mathrm{J/C}$$

El potencial eléctrico es una medida de la energía potencial por unidad de carga.

$$\Delta V \equiv \frac{\Delta U}{q_0} = -\int_{\text{Ⓐ}}^{\text{Ⓑ}} \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{s}}$$

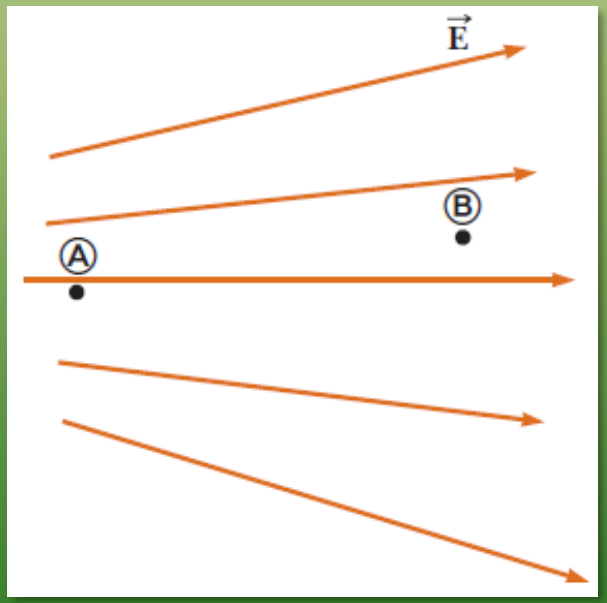
La diferencia de potencial no debe confundirse con la diferencia en energía potencial.

La diferencia de Potencial Eléctrico entre dos puntos depende sólo de la distribución de carga, mientras que la diferencia en Energía Potencial existe sólo si se desplaza una carga de prueba entre los puntos.

¡Sólo las diferencias en el potencial eléctrico tienen significado!

Diferencias de potencial en un campo eléctrico uniforme

$$V_B - V_A = \Delta V = -\int_A^B \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{s}} = -\int_A^B (E\cos 0^\circ)\, ds = -\int_A^B E\, ds$$



$$\Delta V = -E\int_A^B ds = -Ed$$

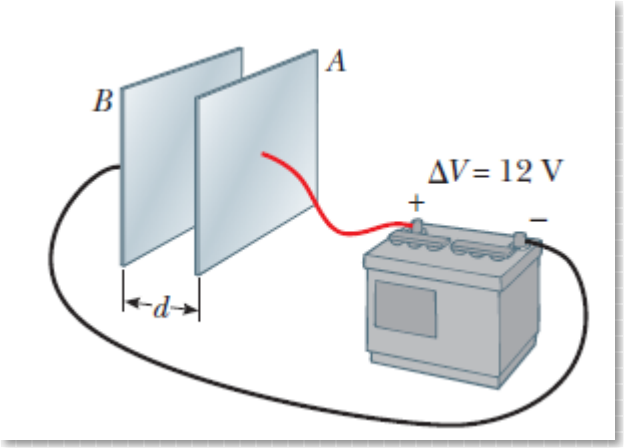
Si una carga de prueba q_0 se mueve desde el en un campo eléctrico constante de un punto A a un punto B, se puede calcular el cambio en la energía potencial del sistema carga–campo de la siguiente manera:

$$\Delta U = q_0\, \Delta V = -q_0 Ed$$

Las líneas de campo eléctrico siempre apuntan en dirección en que disminuye el potencial.

Campo eléctrico entre dos placas paralelas de carga opuesta

Una batería de 12 V se conecta entre dos placas paralelas. La separación entre las placas es $d = 0.30\ cm$ y se supone que el campo eléctrico entre las placas es uniforme.



Encuentre la magnitud del campo eléctrico entre las placas.

$$E = \frac{|V_B - V_A|}{d} = \frac{12\ \text{V}}{0.30 \times 10^{-2}\ \text{m}} = 4.0 \times 10^3\ \text{V/m}$$

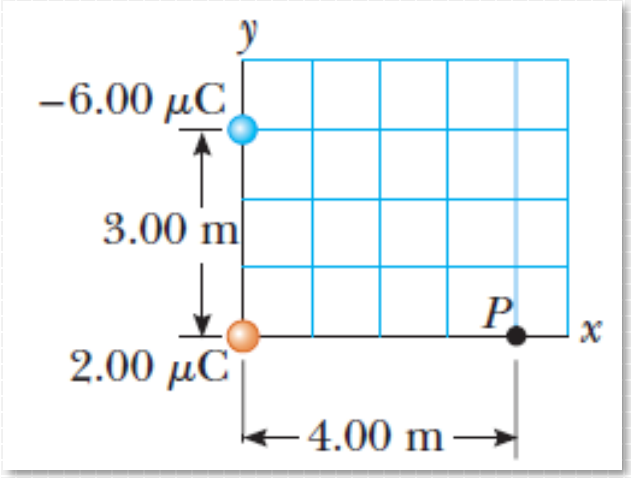
¿A qué distancia d la magnitud del campo eléctrico se duplicará?

A una distancia $d = 0.15\ cm$ la magnitud del Campo eléctrico se duplica.

Potencial eléctrico debido a dos cargas puntuales

Como se muestra en la figura, una carga $q_1 = 2.00\ \mu C$ se ubica en el origen y una carga $q_2 = -6.00\ \mu C$ se ubica en $(0, 3.00)\ m$.

Encuentre el potencial eléctrico total debido a estas cargas en el punto P, cuyas coordenadas son $(4.00, 0)\ m$.



$$V_P = k_e\left(\frac{q_1}{r_1} + \frac{q_2}{r_2}\right)$$

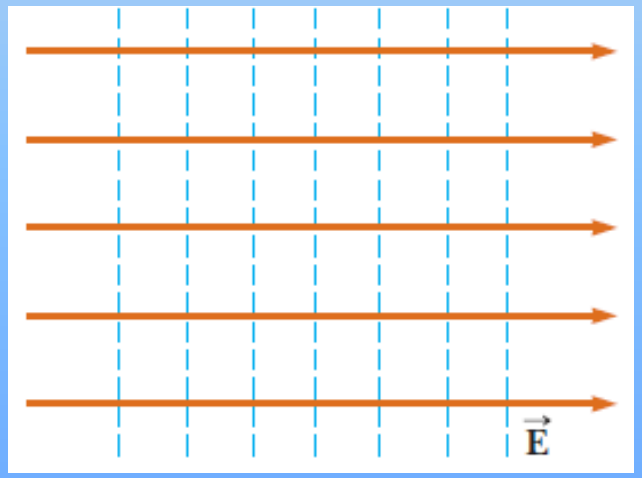
$$V_P = (8.99 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2/C^2})\left(\frac{2.00 \times 10^{-6}\ \mathrm{C}}{4.00\ \mathrm{m}} + \frac{-6.00 \times 10^{-6}\ \mathrm{C}}{5.00\ \mathrm{m}}\right)$$

$$= -6.29 \times 10^3\ \mathrm{V}$$

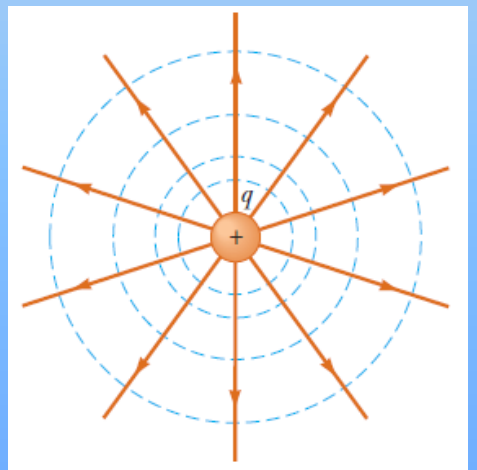
Obtención del valor del campo eléctrico a partir del potencial eléctrico

Si el campo eléctrico tiene sólo una componente se tiene que:

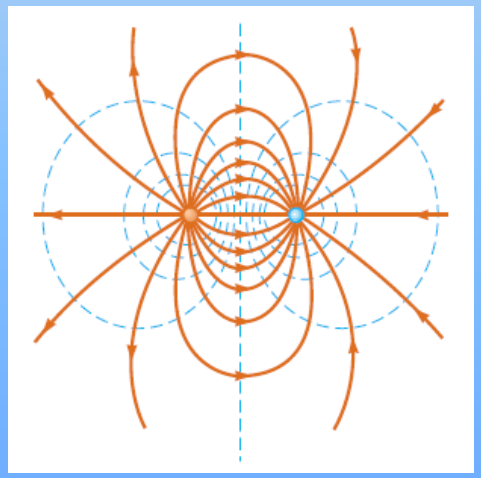
$$E_x = -\frac{dV}{dx}$$



Plano infinito de carga.



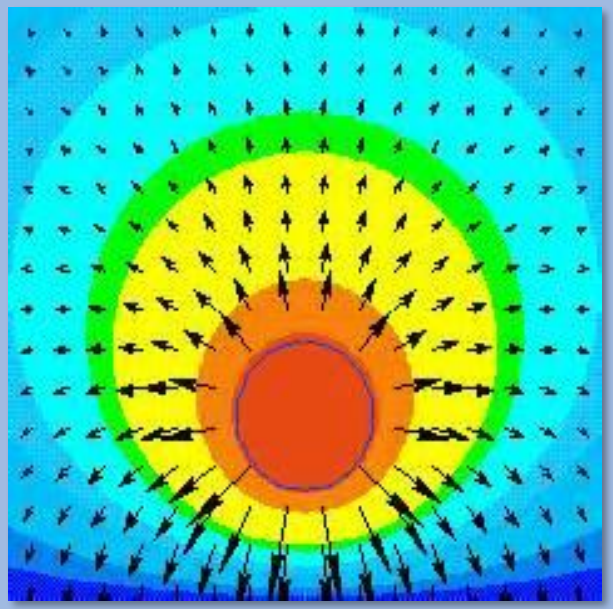
Una carga puntual.



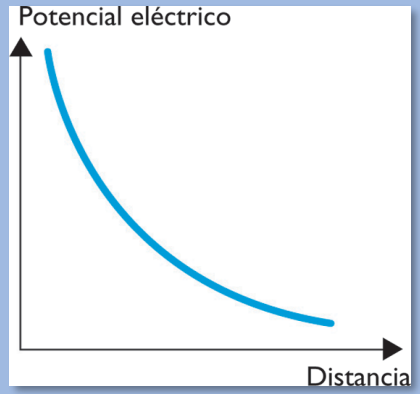
Un dipolo eléctrico.

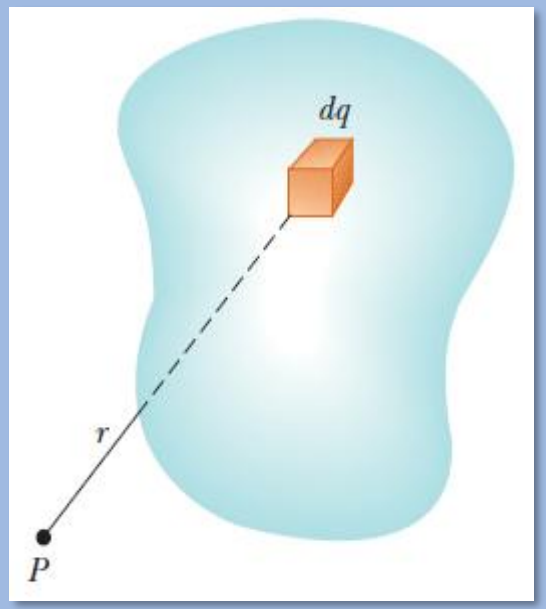
En todos los casos, las superficies equipotenciales son perpendiculares a las líneas de campo eléctrico en todos los puntos.

Potencial eléctrico debido a distribuciones de carga continuas



$$V = k_e \int \frac{dq}{r}$$



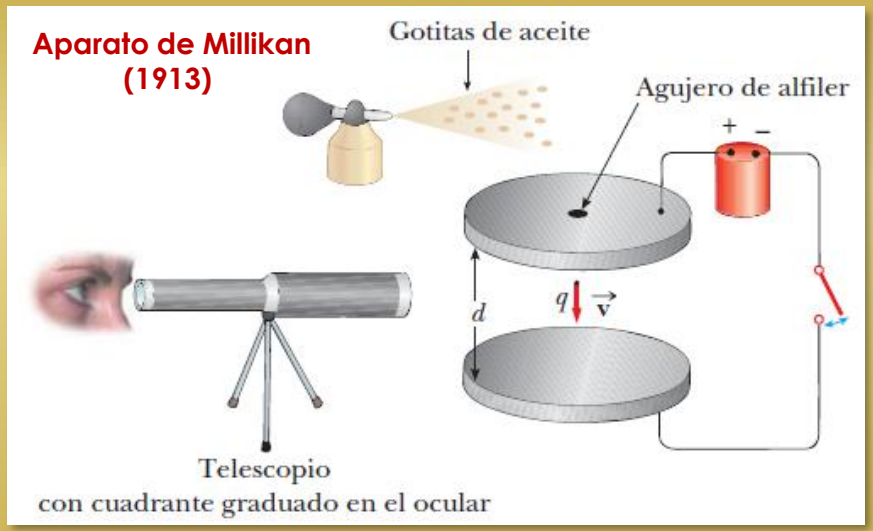


Es posible calcular el potencial eléctrico en el punto P debido a una distribución de carga continua, al dividir la distribución de carga en los elementos de carga dq y sumar las contribuciones del potencial eléctrico de todos ellos.

Premio Nobel de Física en 1923

El experimento de la gota de aceite de Millikan

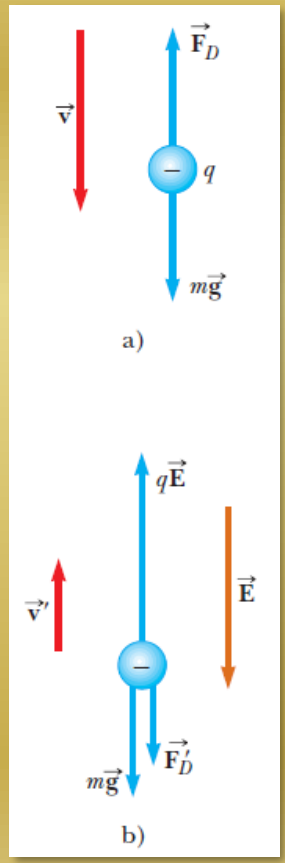
- ✓ *Mide la magnitud de la carga elemental de un electrón e.*
- ✓ *Demuestra la naturaleza cuantizada de esta carga.*



Millikan utilizó rayos X para ionizar el aire en la cámara; así, los electrones liberados se adhieren a las gotitas de aceite y las cargan negativamente

a) Con el campo eléctrico desactivado, la gotita cae a una velocidad terminal V, bajo la influencia de las fuerzas gravitacionales y de arrastre.

b) Cuando el campo eléctrico está activado, la gotita se mueve hacia arriba a una velocidad terminal V'. bajo la influencia de las fuerzas eléctrica, gravitacional y de arrastre. Como resultado, el campo eléctrico es cero en el interior del conductor.



Después de medir de miles de gotas, se encontró que todas las gotitas tenían, con aproximadamente 1% de precisión, una carga igual a algún entero múltiplo de la carga elemental e:

$$q = ne \quad n = 0, -1, -2, -3, \ldots$$

DEFINICIONES

La **diferencia de potencial** ΔV entre los puntos Ⓐ y Ⓑ en un campo eléctrico $\vec{\mathbf{E}}$ se define como

$$\Delta V \equiv \frac{\Delta U}{q_0} = -\int_{Ⓐ}^{Ⓑ} \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{s}}$$

El **potencial eléctrico** $V = U/q_0$ es una cantidad escalar tiene las unidades de joules por cada coulomb, donde $\mathrm{J/C} \equiv 1\ \mathrm{V}$.

Una **superficie equipotencial** es aquella donde todos los puntos tienen el mismo potencial eléctrico. Las superficies equipotenciales son perpendiculares a líneas de campo eléctrico.

CONCEPTOS Y PRINCIPIOS

Cuando una carga de prueba positiva q_0 se mueve entre los puntos Ⓐ y Ⓑ en un campo eléctrico $\vec{\mathbf{E}}$, el **cambio en la energía potencial del sistema carga-campo** es

$$\Delta U = -q_0 \int_{Ⓐ}^{Ⓑ} \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{s}}$$

La diferencia de potencial entre dos puntos Ⓐ y Ⓑ separados una distancia d en un campo eléctrico uniforme $\vec{\mathbf{E}}$, donde $\vec{\mathbf{s}}$ es un vector que apunta de Ⓐ a Ⓑ y es paralelo a $\vec{\mathbf{E}}$, es

$$\Delta V = -E \int_{Ⓐ}^{Ⓑ} ds = -Ed$$

Si define $V = 0$ en $r = \infty$, el potencial eléctrico debido a una carga puntual a cualquier distancia r desde la carga es

$$V = k_e \frac{q}{r}$$

El potencial eléctrico asociado con un grupo de cargas puntuales se obtiene al sumar los potenciales debidos a las cargas individuales.

La **energía potencial asociada con un par de cargas puntuales** separadas una distancia r_{12} es

$$U = k_e \frac{q_1 q_2}{r_{12}}$$

La energía potencial de una distribución de cargas puntuales se obtiene al sumarlas sobre todos los pares de partículas.

Si conoce el potencial eléctrico como función de las coordenadas x, y y z, puede obtener las componentes del campo eléctrico al tomar la derivada negativa del potencial eléctrico respecto a las coordenadas. Por ejemplo, la componente x del campo eléctrico es

$$E_x = -\frac{dV}{dx}$$

El **potencial eléctrico debido a una distribución de carga continua** es

$$V = k_e \int \frac{dq}{r}$$

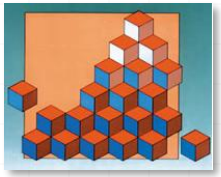
Cada punto en la superficie de un conductor cargado en equilibrio electrostático tiene el mismo potencial eléctrico. El potencial es constante en todas partes dentro del conductor e igual a su valor en la superficie.

CURSO de
Electricidad y Magnetismo

FACULTAD de
INGENIERÍA

Revisión del Examen

Objetivos de la Lección



Al terminar esta lección el alumno será capaz de:

- *Listar los problemas del examen de medio semestre.*
- *Identificar las dudas para su resolución.*
- *Describir los métodos para resolver cada uno de los problemas.*
- *Reconocer los errores cometidos al resolver el examen.*
- *Resolver nuevamente los problemas del examen.*

1. (1 punto) Sean $\boldsymbol{r_1} = (1, 2, 3)$ y $\boldsymbol{r_2} = (-4,\ 6,\ -7)$ dos vectores en el espacio tridimensional $\mathbb{R}^3$, calcule:

a) El ángulo θ entre ambos vectores.

RESPUESTA:

a) El ángulo θ entre ambos vectores.

RESPUESTA:

$$\boldsymbol{r_1} \cdot \boldsymbol{r_2} = |\boldsymbol{r_1}||\boldsymbol{r_2}| \cos\theta$$

$$\Rightarrow \quad \theta = \cos^{-1}\left(\frac{\boldsymbol{r_1} \cdot \boldsymbol{r_2}}{|\boldsymbol{r_1}||\boldsymbol{r_2}|}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{(1,2,3)\cdot(-4,\ 6,\ -7)}{\sqrt{1^2+2^2+3^2}\sqrt{(-4)^2+6^2+(-7)^2}}\right)$$

$$= \cos^{-1}\left(\frac{-4+12-21}{\sqrt{1+4+9}\sqrt{14+36+49}}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{-13}{\sqrt{14}\sqrt{99}}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{-13}{\sqrt{14}\sqrt{99}}\right)$$

$$= \cos^{-1}\left(\frac{-13}{\sqrt{14}\sqrt{99}}\right) = \cos^{-1}\left[\frac{-13}{(3.74)*(9.94)}\right] = \cos^{-1}\left(\frac{-13}{37.17}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{-13}{37.17}\right)$$

$$= \cos^{-1}(-0.34) = 109.87°$$

b) La magnitud del vector perpendicular $\boldsymbol{r}_\perp = \boldsymbol{r}_1 \times \boldsymbol{r}_2$.

RESPUESTA:

b) La magnitud del vector perpendicular $\boldsymbol{r}_\perp = \boldsymbol{r}_1 \times \boldsymbol{r}_2$.

RESPUESTA:

$$\boldsymbol{r}_\perp = \boldsymbol{r}_1 \times \boldsymbol{r}_2 = \begin{vmatrix} \hat{\boldsymbol{\imath}} & \hat{\boldsymbol{\jmath}} & \hat{\boldsymbol{k}} \\ x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \end{vmatrix} = (y_1 z_2 - z_1 y_2)\hat{\boldsymbol{\imath}} + (z_1 x_2 - x_1 z_2)\hat{\boldsymbol{\jmath}} + (x_1 y_2 - y_1 x_2)\hat{\boldsymbol{k}}$$

$$\Rightarrow \quad \boldsymbol{r}_\perp = \begin{vmatrix} \hat{\boldsymbol{\imath}} & \hat{\boldsymbol{\jmath}} & \hat{\boldsymbol{k}} \\ 1 & 2 & 3 \\ -4 & 6 & -7 \end{vmatrix} = (-14 - 18)\hat{\boldsymbol{\imath}} + (-12 + 7)\hat{\boldsymbol{\jmath}} + (6 + 8)\hat{\boldsymbol{k}}$$

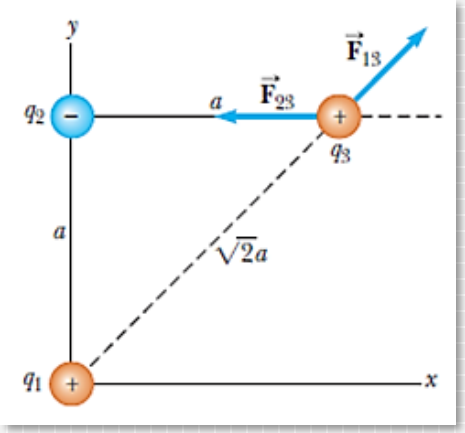
$$= -32\hat{\boldsymbol{\imath}} - 5\hat{\boldsymbol{\jmath}} + 14\hat{\boldsymbol{k}} = (-32, -5, 14)$$

$$\Rightarrow \quad |\boldsymbol{r}_\perp| = \sqrt{(-32)^2 + (-5)^2 + (14)^2} = \sqrt{1024 + 25 + 196} = \sqrt{1245} = 35.28$$

2. (1 punto) Considere tres cargas puntuales ubicadas en las esquinas de un triángulo rectángulo, como se muestra en la figura, donde $q_1 = q_3 = 5.0\ \mu C$, $q_2 = -2.0\ \mu C$ y $a = 0.10\ m$.

a) Encuentre la fuerza resultante que se ejerce sobre q_3.

b) Determine la magnitud de la fuerza neta.



RESPUESTAS:

$$F_{23} = k_e \frac{|q_2||q_3|}{a^2}$$

$$= (8.99 \times 10^9\ \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(2.0 \times 10^{-6}\ \text{C})(5.0 \times 10^{-6}\ \text{C})}{(0.10\ \text{m})^2} = 9.0\ \text{N}$$

$$F_{13} = k_e \frac{|q_1||q_3|}{(\sqrt{2}a)^2}$$

$$= (8.99 \times 10^9\ \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(5.0 \times 10^{-6}\ \text{C})(5.0 \times 10^{-6}\ \text{C})}{2(0.10\ \text{m})^2} = 11\ \text{N}$$

$$F_{13x} = F_{13} \cos 45° = 7.9\ \text{N}$$

$$F_{13y} = F_{13} \text{ sen } 45° = 7.9\ \text{N}$$

$$F_{3x} = F_{13x} + F_{23x} = 7.9\ \text{N} + (-9.0\ \text{N}) = -1.1\ \text{N}$$

$$F_{3y} = F_{13y} + F_{23y} = 7.9\ \text{N} + 0 = 7.9\ \text{N}$$

$$\vec{F}_3 = (-1.1\hat{i} + 7.9\hat{j})\ \text{N}$$

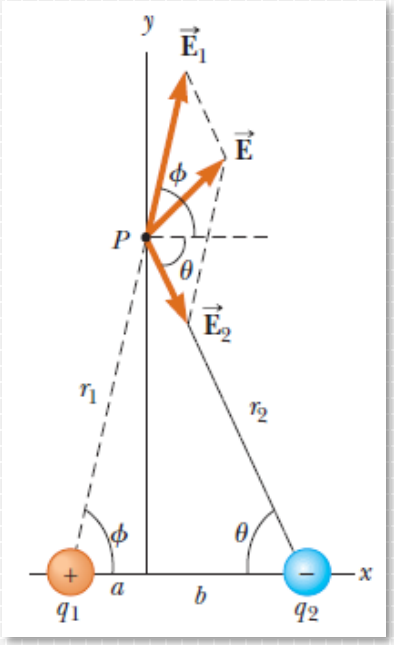
$$|F_3| = \sqrt{(-1.1\ N)^2 + (7.9\ N)^2}$$

$$= \sqrt{1.21\ N^2 + 62.41\ N^2} = \sqrt{63.62\ N^2} = 7.97\ N$$

3. (1 punto) Las cargas eléctricas q_1 y q_2 se ubican en el eje X, a distancias $a = -2$ y $b = 3$, respectivamente, del origen, como se muestra en la figura.

a) Encuentre las componentes del campo eléctrico neto en el punto $P = (0,5)$, que está sobre el eje Y.

b) Especifique en qué caso las componentes horizontales se anulan.



RESPUESTAS:

$$E_1 = k_e \frac{|q_1|}{r_1^{\,2}} = k_e \frac{|q_1|}{(a^2 + y^2)}$$

$$E_2 = k_e \frac{|q_2|}{r_2^{\,2}} = k_e \frac{|q_2|}{(b^2 + y^2)}$$

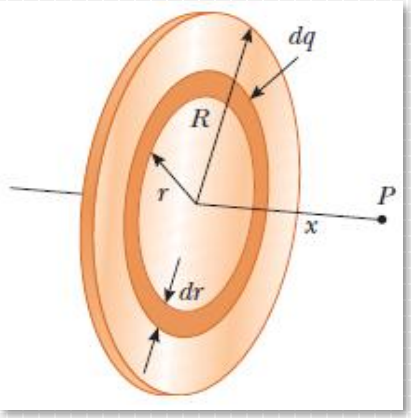
$$\vec{\mathbf{E}}_1 = k_e \frac{|q_1|}{(a^2 + y^2)} \cos\phi\,\hat{\mathbf{i}} + k_e \frac{|q_1|}{(a^2 + y^2)} \operatorname{sen}\phi\,\hat{\mathbf{j}}$$

$$\vec{\mathbf{E}}_2 = k_e \frac{|q_2|}{(b^2 + y^2)} \cos\theta\,\hat{\mathbf{i}} - k_e \frac{|q_2|}{(b^2 + y^2)} \operatorname{sen}\theta\,\hat{\mathbf{j}}$$

$$E_x = E_{1x} + E_{2x} = k_e \frac{|q_1|}{(a^2 + y^2)} \cos\phi + k_e \frac{|q_2|}{(b^2 + y^2)} \cos\theta$$

$$E_y = E_{1y} + E_{2y} = k_e \frac{|q_1|}{a^2 + y^2} \operatorname{sen}\phi - k_e \frac{|q_2|}{b^2 + y^2} \operatorname{sen}\theta$$

4. (2 puntos) Un disco de radio R tiene una densidad de carga superficial uniforme σ.



a) Calcule el campo eléctrico en un punto P que se encuentra a lo largo del eje perpendicular central del disco y a una distancia x del centro del disco.

b) ¿Qué pasa con las componentes horizontales? Justifique su respuesta.

$$dq = \sigma\, dA = \sigma(2\pi r\, dr) = 2\pi\sigma r\, dr$$

RESPUESTAS:

$$dE_x = k_e \frac{dq}{r^2}\cos\theta = k_e \frac{dq}{(a^2 + x^2)}\cos\theta$$

$$\cos\theta = \frac{x}{r} = \frac{x}{(a^2 + x^2)^{1/2}}$$

$$dE_x = \frac{k_e x}{(r^2 + x^2)^{3/2}}(2\pi\sigma r\, dr)$$

$$E_x = k_e x \pi\sigma \int_0^R \frac{2r\, dr}{(r^2 + x^2)^{3/2}}$$

$$= k_e x \pi\sigma \int_0^R (r^2 + x^2)^{-3/2}\, d(r^2)$$

$$= k_e x \pi\sigma \left[\frac{(r^2 + x^2)^{-1/2}}{-1/2}\right]_0^R = 2\pi k_e \sigma\left[1 - \frac{x}{(R^2 + x^2)^{1/2}}\right]$$

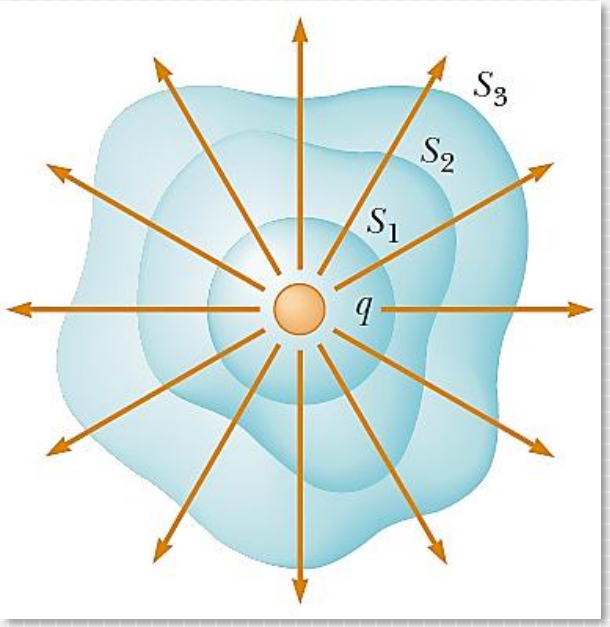
5. (1 punto) La ley de Gauss describe una correspondencia entre el flujo eléctrico neto a través de una superficie cerrada y la carga encerrada en la superficie.

a) Enuncie matemáticamente la ley de Gauss.

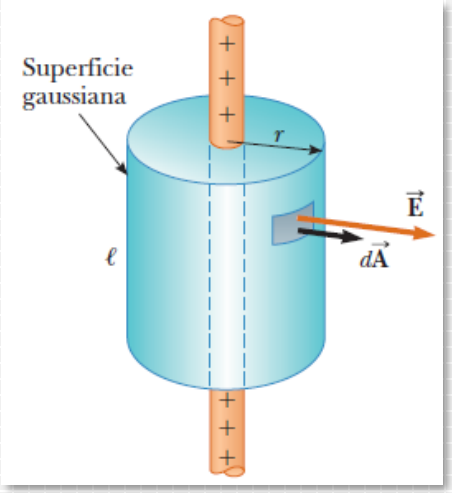
b) Explique por qué el flujo eléctrico a través de una superficie cerrada que tiene una carga encerrada conocida es independiente del tamaño o forma de la superficie.

RESPUESTAS:

$$\oint_S \boldsymbol{E} \cdot d\boldsymbol{s} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$



6. (1 punto) Usando la Ley de Gauss, encuentre el campo eléctrico a una distancia r desde una línea de carga positiva de longitud infinita y carga constante por unidad de longitud λ.



RESPUESTA:

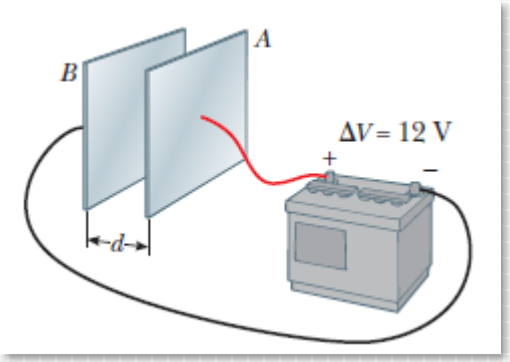
$$\Phi_E = \oint \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{A}} = E \oint dA = EA = \frac{q_{\text{in}}}{\epsilon_0} = \frac{\lambda \ell}{\epsilon_0}$$

$$A = 2\pi r \ell$$

$$E(2\pi r \ell) = \frac{\lambda \ell}{\epsilon_0}$$

$$E = \frac{\lambda}{2\pi \epsilon_0 r} = 2k_e \frac{\lambda}{r}$$

7. (1 punto) Una batería de 12 V se conecta entre dos placas paralelas. La separación entre las placas es $d = 0.30\ cm$ y se supone que el campo eléctrico entre las placas es uniforme.



a) Encuentre la magnitud del campo eléctrico entre las placas.

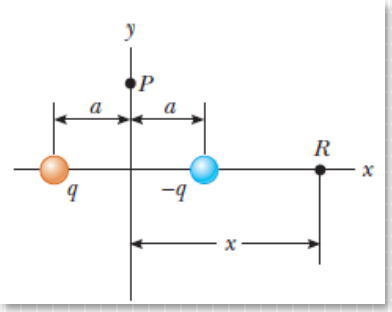
b) ¿A qué distancia d la magnitud del campo eléctrico se duplicará?

RESPUESTAS:

$$E = \frac{|V_B - V_A|}{d} = \frac{12\ \text{V}}{0.30 \times 10^{-2}\ \text{m}} = 4.0 \times 10^3\ \text{V/m}$$

A una distancia $d = 0.15\ cm$ la magnitud del Campo eléctrico se duplica.

8. (2 puntos) Un dipolo eléctrico consiste de dos cargas de igual magnitud y signo opuesto separadas por una distancia $2a$. El dipolo está a lo largo del eje X y tiene centro en el origen.



a) Calcule el potencial eléctrico en el punto P sobre el eje Y.

b) Calcule el potencial eléctrico en el punto R sobre el eje X.

RESPUESTAS:

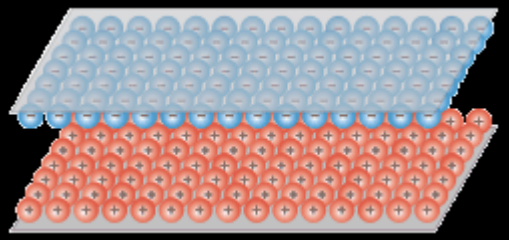
$$V_P = k_e \sum_i \frac{q_i}{r_i} = k_e \left(\frac{q}{\sqrt{a^2 + y^2}} + \frac{-q}{\sqrt{a^2 + y^2}} \right) = 0$$

$$V_R = k_e \sum_i \frac{q_i}{r_i} = k_e \left(\frac{-q}{x - a} + \frac{q}{x + a} \right) = -\frac{2k_e qa}{x^2 - a^2}$$

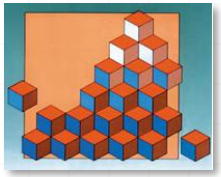
CURSO de
Electricidad y Magnetismo

FACULTAD de
INGENIERÍA

Capacitancia y Materiales Dieléctricos



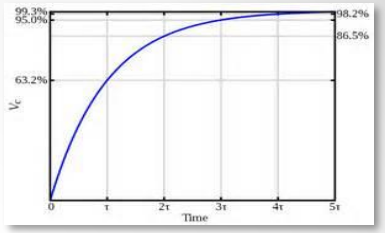
Objetivos de la Lección



Al terminar esta lección el alumno será capaz de:

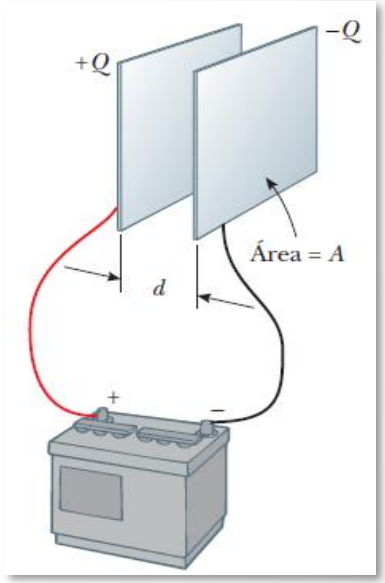
- *Definir el concepto de capacitancia.*
- *Calcular la capacitancia de sistemas simples.*
- *Distinguir diferentes combinaciones de capacitores.*
- *Aplicar los conocimientos adquiridos a sistemas de capacitores con material dieléctrico.*
- *Identificar a los capacitores como uno de los tres elementos (junto con las resistencias e inductores) simples de los circuitos eléctricos.*

Capacitancia



Los capacitores se usan de manera regular en diversidad de circuitos eléctricos. Por ejemplo, se usan para sintonizar la frecuencia de los receptores de radio, en filtros de fuentes de energía eléctrica, para eliminar las chispas en los sistemas de encendido de los automóviles y como dispositivos de almacenamiento de energía en unidades de destello electrónico.

Un capacitor de placas paralelas consiste en dos placas conductoras paralelas, cada una con una superficie A, separadas una distancia d.



La **capacitancia** C de un capacitor se define como la relación de la magnitud de la carga en cualquiera de los conductores a la magnitud de la diferencia de potencial entre dichos conductores:

$$C \equiv \frac{Q}{\Delta V}$$

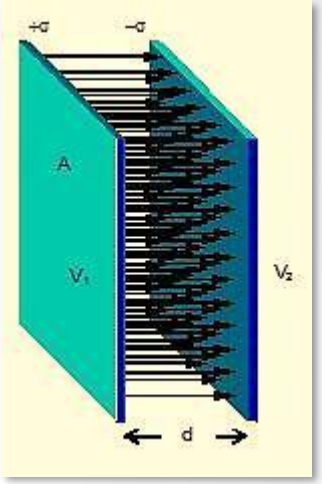
La unidad del SI para capacitancia es el farad (F), nombre puesto en honor de Michael Faraday.

$$1\ \text{F} = 1\ \text{C/V}$$

El farad es una unidad de capacitancia muy grande. En la práctica, los dispositivos representativos tienen capacitancias con intervalos entre microfarads (10^{-6} F) a picofarads (10^{-12} F).

Capacitor de placas paralelas

Dos placas metálicas paralelas de igual área A están separadas por una distancia d. Una placa tiene una carga +Q y la otra tiene una carga – Q.



La densidad de carga superficial en cada placa es $\sigma = Q/A$.

Si las placas están muy juntas (en comparación con su longitud y ancho), se puede suponer que el campo eléctrico es uniforme entre las placas y cero en cualquier otra parte.

El valor del campo eléctrico entre las placas es:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{Q}{\epsilon_0 A}$$

Ya que el campo entre las placas es uniforme, la magnitud de la diferencia de potencial entre las placas es igual a Ed:

$$\Delta V = Ed = \frac{Qd}{\epsilon_0 A}$$

Al sustituir este resultado se encuentra que:

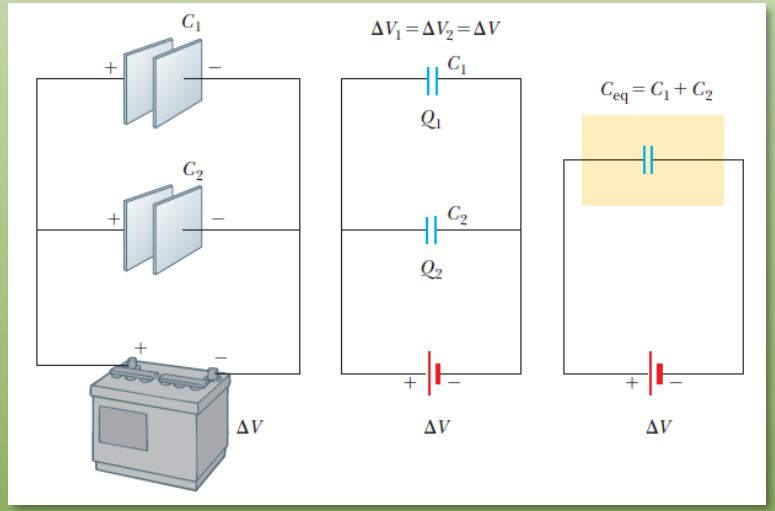
$$C = \frac{Q}{\Delta V} = \frac{Q}{Qd/\epsilon_0 A}$$

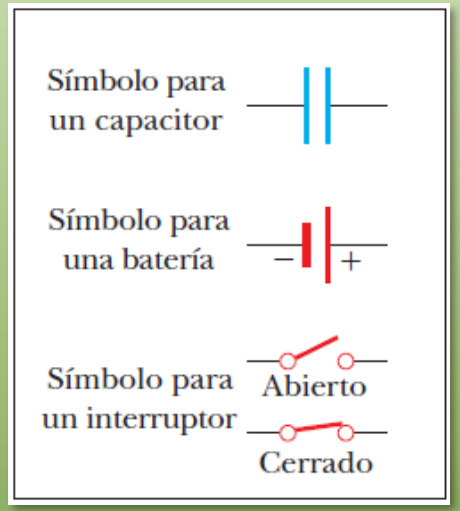
$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d}$$

- **La capacitancia de un capacitor de placas paralelas es proporcional al área de sus placas e inversamente proporcional a la separación de las placas.**

Combinaciones de Capacitores

Combinación en Paralelo





Las diferencias de potencial individuales a través de capacitores conectados en paralelo son las mismas e iguales a la diferencia de potencial aplicada a través de la combinación.

$$\Delta V_1 = \Delta V_2 = \Delta V$$

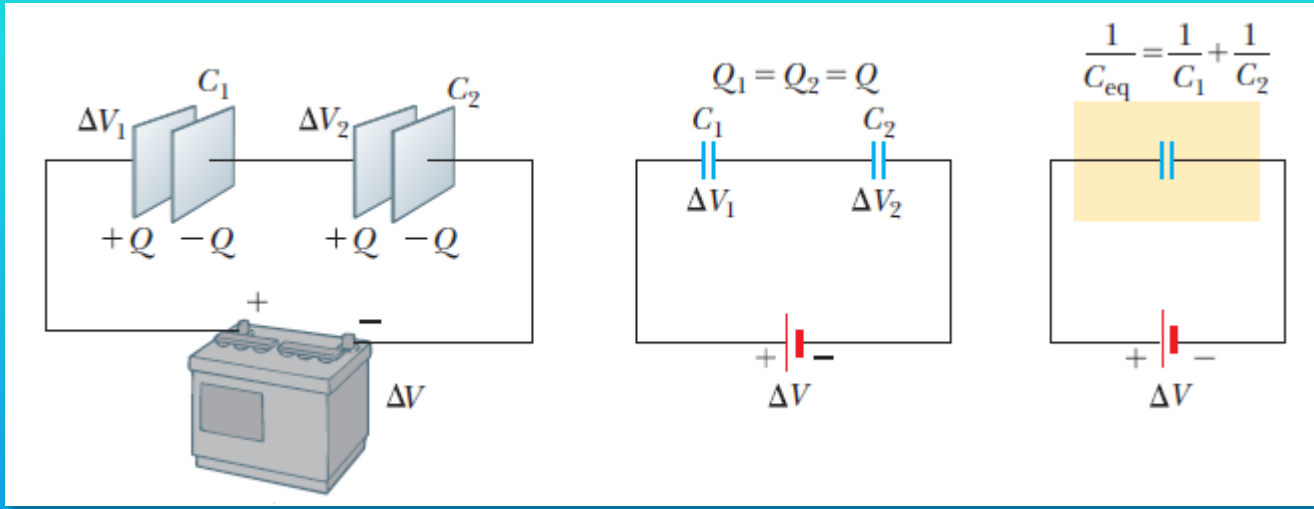
La carga total Q_{tot} almacenada por los dos capacitores es: $Q_{tot} = Q_1 + Q_2$

$$Q_{tot} = C_{eq}\,\Delta V \quad \Longrightarrow \quad C_{eq}\,\Delta V = C_1\,\Delta V_1 + C_2\,\Delta V_2 \quad \Longrightarrow \quad C_{eq} = C_1 + C_2$$

$\therefore$ $C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3 + \cdots$ (combinación en paralelo)

Combinaciones de Capacitores

Combinación en Serie



El Voltaje total ΔV_{tot} almacenada por los dos capacitores es:

$$\Delta V_{\text{tot}} = \Delta V_1 + \Delta V_2$$

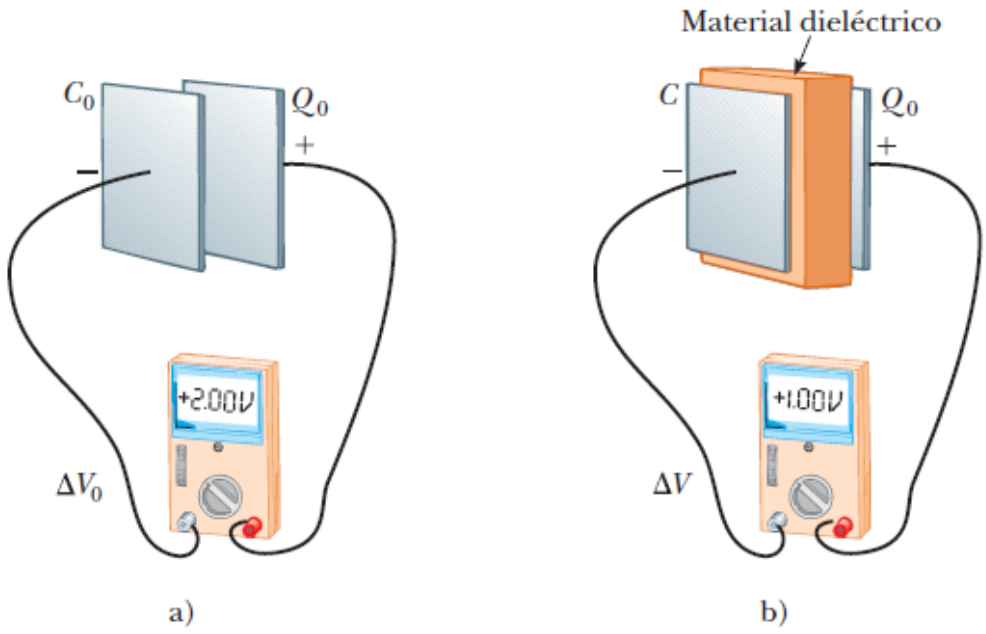
Las cargas de los capacitores conectados en serie son iguales: $Q_1 = Q_2 = Q$

$$\frac{Q}{C_{\text{eq}}} = \frac{Q_1}{C_1} + \frac{Q_2}{C_2} \quad \Longrightarrow \quad \frac{1}{C_{\text{eq}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

$$\therefore \quad \frac{1}{C_{\text{eq}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \cdots \quad \text{(combinaciones en serie)}$$

Capacitores con Material Dieléctrico

Un dieléctrico es un material no conductor, como el hule, el vidrio o el papel encerado.



Un capacitor cargado a) antes y b) después de haber insertado un material dieléctrico entre las placas. La carga existente sobre las placas se conserva sin cambio, pero la diferencia de potencial disminuye de ΔV_0 a $\Delta V = \Delta V_0/\kappa$. Por lo tanto, la capacitancia se incrementa de C_0 a κC_0.

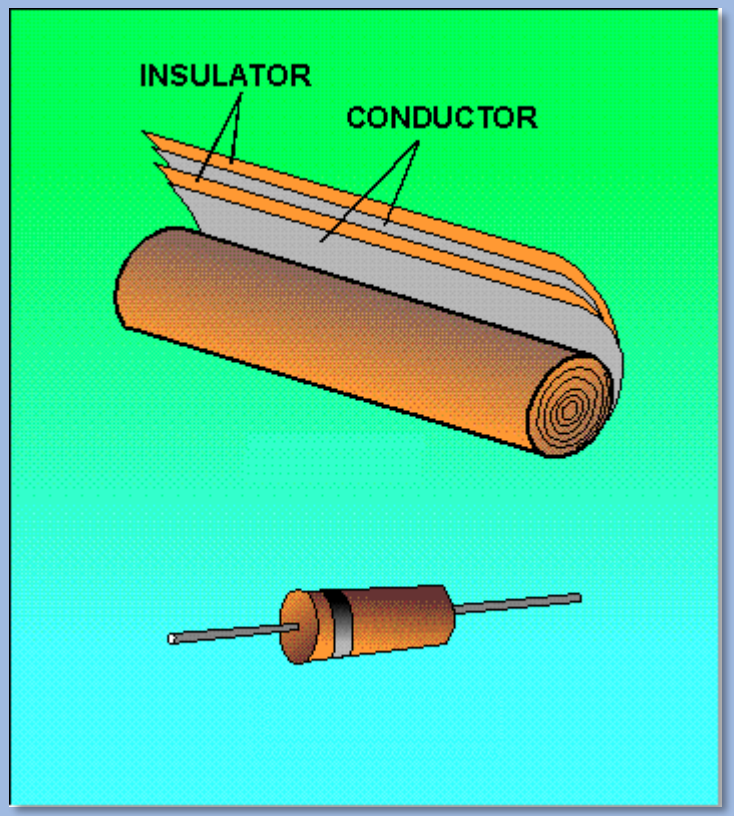
En el caso de un capacitor de placas paralelas, se expresa la capacitancia cuando el capacitor está lleno de material dieléctrico como sigue:

$$C = \kappa \frac{\epsilon_0 A}{d}$$

Capacitores con Material Dieléctrico

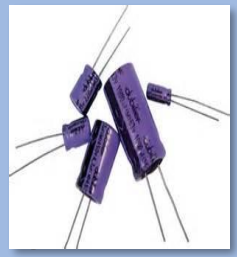
Los voltajes con y sin dieléctrico están relacionados mediante el factor $\kappa > 1$ *constante dieléctrica* como sigue:

$$\Delta V = \frac{\Delta V_0}{\kappa}$$



La constante dieléctrica varía de un material a otro.

Ya que la carga en el capacitor no cambia, la capacitancia debe tomar el valor:

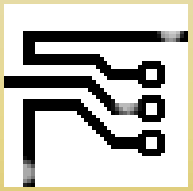


$$C = \frac{Q_0}{\Delta V} = \frac{Q_0}{\Delta V_0/\kappa} = \kappa\frac{Q_0}{\Delta V_0}$$

$$C = \kappa C_0$$

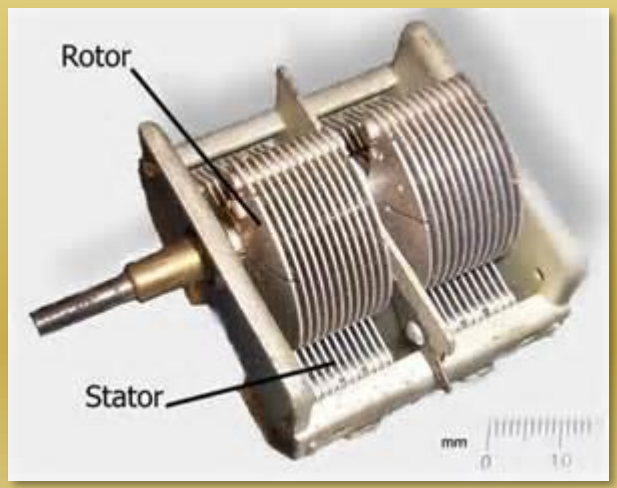
Es decir, la capacitancia aumenta en un factor κ cuando el material dieléctrico llena por completo la región entre placas

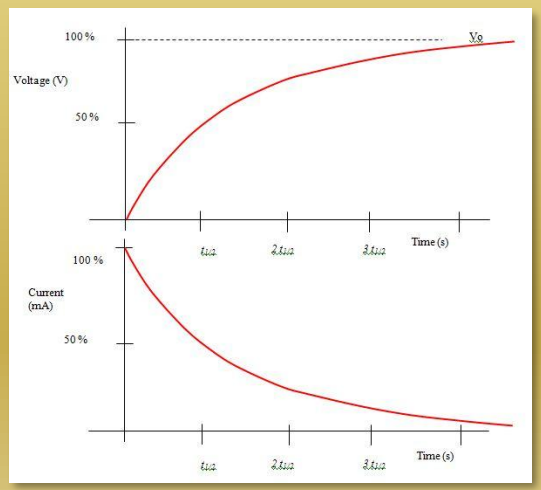
Capacitor Variable



Los capacitores de aire variables son utilizados en circuitos receptores de radio y TV, para igualar la impedancia en los sintonizadores de las antenas y fijar la frecuencia de resonancia para estos equipos.

Suelen estar hechos de placas semicirculares, colocadas entre sí a una cierta distancia, y conectadas eléctricamente. Un segundo conjunto de placas idénticas, está intercaladas con el primer conjunto. Cada placa en el segundo juego está a la mitad de las del primer conjunto y pueden girar como una sola unidad. La capacitancia de estos dispositivos está en función del ángulo de rotación.





Capacitor variable. La capacitancia de este dispositivo varía cuando se hace girar uno de los conjuntos de placas metálicas de manera que quede entre el conjunto fijo de placas.

DEFINICIONES

Un **capacitor** consiste en dos conductores que portan cargas de igual magnitud y signo opuesto. La **capacitancia** C de cualquier capacitor es la relación de la carga Q sobre cualquier conductor, a la diferencia de potencial ΔV entre ellos:

$$C \equiv \frac{Q}{\Delta V}$$

La capacitancia sólo depende de la geométria de los conductores y no de una fuente externa de carga o diferencia de potencial. La unidad del SI para capacitancia es coulomb por cada volt, o **farad** (F): 1 F = 1 C/V.

El **momento de dipolo eléctrico** $\vec{\mathbf{p}}$, de un dipolo eléctrico tiene una magnitud

$$p \equiv 2aq$$

donde $2a$ es la distancia entre las cargas q y $-q$. La dirección del vector momento de dipolo eléctrico es desde la carga negativa hacia la carga positiva.

CONCEPTOS Y PRINCIPIOS

Si dos o más capacitores se conectan en paralelo, la diferencia de potencial es la misma a través de todos los capacitores. La capacitancia equivalente de una **combinación en paralelo** de capacitores es

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3 + \cdots$$

Si dos o más capacitores se conectan en serie, la carga es la misma en todos los capacitores, y la capacitancia equivalente de la **combinación en serie** se conoce por

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \cdots$$

Estas dos ecuaciones le permiten simplificar muchos circuitos eléctricos al sustituir múltiples capacitores con una sola capacitancia equivalente.

En un capacitor se almacena energía porque el proceso de carga es equivalente a la transferencia de cargas de un conductor con un potencial eléctrico más bajo, a otro conductor con un potencial más alto. La energía almacenada en un capacitor con carga Q es

$$U = \frac{Q^2}{2C} = \tfrac{1}{2}Q\,\Delta V = \tfrac{1}{2}C(\Delta V)^2$$

Cuando un material dieléctrico se inserta entre las placas de un capacitor, la capacitancia aumenta por un factor adimensional κ, llamado **constante dieléctrica:**

$$C = \kappa C_0$$

donde C_0 es la capacitancia en ausencia del dieléctrico.

El momento de torsión que actúa sobre un dipolo eléctrico en un campo eléctrico uniforme $\vec{\mathbf{E}}$ es

$$\vec{\boldsymbol{\tau}} = \vec{\mathbf{p}} \times \vec{\mathbf{E}}$$

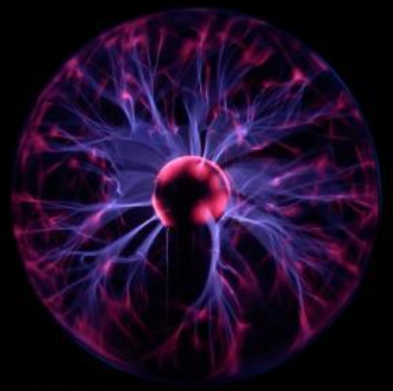
La energía potencial del sistema de un dipolo eléctrico en un campo eléctrico externo uniforme $\vec{\mathbf{E}}$ es

$$U = -\vec{\mathbf{p}} \cdot \vec{\mathbf{E}}$$

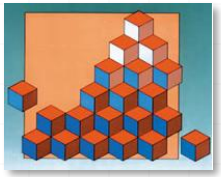
CURSO de
Electricidad y Magnetismo

FACULTAD de
INGENIERÍA

Corriente y Resistencia



Objetivos de la Lección



Al terminar esta lección el alumno será capaz de:

- *Definir el concepto de corriente eléctrica.*
- *Describir la corriente eléctrica desde el punto de vista microscópico.*
- *Distinguir la diferencia entre un conductor y un aislante.*
- *Explicar factores que impiden el flujo de carga en los conductores.*
- *Listar las características principales de las resistencias.*
- *Identificar los resistores como componentes de un circuito.*

Corriente Eléctrica

Se usa el término *corriente eléctrica*, o simplemente *corriente*, para describir la relación de flujo de carga.

Las aplicaciones más prácticas de la electricidad se relacionan con corrientes eléctricas. Por ejemplo, la batería en una lámpara de mano produce una corriente en el filamento del foco cuando se activa el interruptor.

Muchos electrodomésticos funcionan con corriente alterna. En estas situaciones comunes, existe corriente en un conductor tal como en un alambre de cobre.

Además las corrientes pueden existir afuera de un conductor. Por ejemplo, un haz de electrones en el cinescopio de un televisor constituye una corriente.

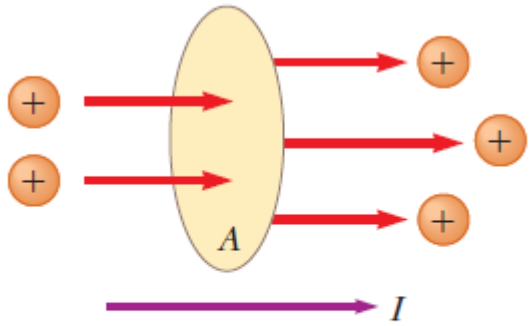
Corriente Eléctrica

La cantidad de flujo eléctrico depende del material a través del cual pasan las cargas y de la diferencia de potencial que existe de un extremo al otro del material.

La dirección de la corriente es la opuesta al flujo de los electrones.

Si ΔQ es la cantidad de carga que pasa a través de una superficie en un intervalo de tiempo Δt, la corriente promedio I_{prom} es igual a la carga que pasa a través de A por unidad de tiempo:

$$I_{\text{prom}} = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$



La rapidez a la cual fluye la carga a través del área se define como corriente I.

Si la proporción a la que circula la carga varía en el tiempo, entonces, la corriente también varía en el tiempo; se define de la corriente instantánea I como el límite diferencial de la corriente promedio:

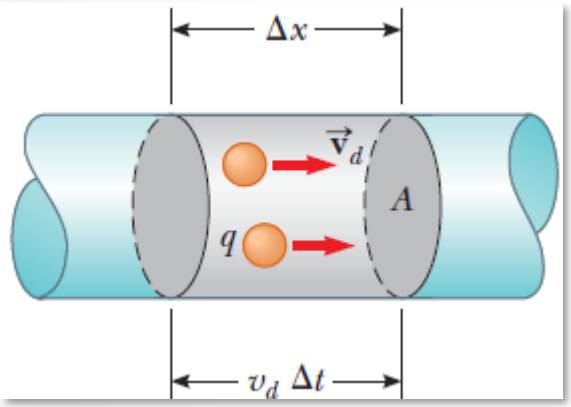
$$I \equiv \frac{dQ}{dt}$$

- La unidad del SI para la corriente es el ampere (A): $1\ \text{A} = 1\ \text{C/s}$

Modelo Microscópico de la Corriente

Se puede relacionar la corriente en un conductor de área A en la sección transversal con el movimiento de los portadores de carga.

El volumen de una sección del conductor de longitud Δx es $A \times \Delta x$:



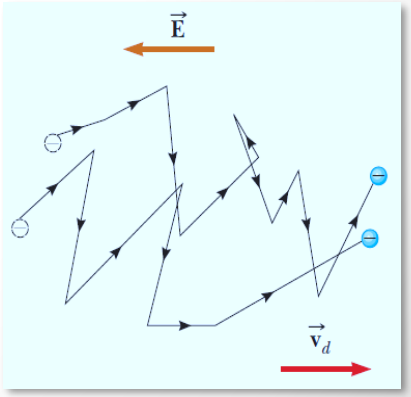
Si *n* representa el número de portadores de carga q que se mueven por cada unidad de volumen, el total de portadores en la región gris es $nA\Delta x$.

Por lo tanto, la carga total de esta sección es:

$$\Delta Q = (nA\,\Delta x)\,q$$

Si divide ambos lados de esta ecuación entre t la corriente promedio en el conductor es:

$$I_{\text{prom}} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = nqv_dA$$



- **La rapidez de los portadores de carga v_d es la rapidez de arrastre.**

Resistencia

GEORG SIMON OHM
Físico alemán
(1789-1854)

La **densidad de corriente** J en el conductor se define como la corriente por unidad de área.

Dado que la corriente es:

$$I = nqv_d A$$

La densidad de corriente es:

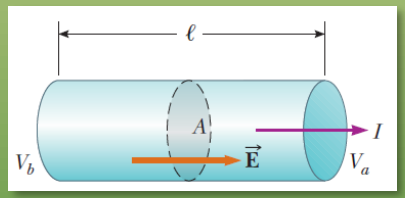
$$J \equiv \frac{I}{A} = nqv_d$$

Donde J tiene unidades en el SI de amperes por cada metro cuadrado.

En algunos materiales, la densidad de corriente es proporcional al campo eléctrico:

$$J = \sigma E$$

La constante de proporcionalidad σ es la *conductividad*.



Conductor uniforme de longitud ℓ y un área de sección transversal A. La diferencia de potencia $\Delta V = V_b - V_a$ que se mantiene de un extremo al otro del conductor establece un campo eléctrico $\vec{E}$, y este campo produce una corriente I que es proporcional a la diferencia de potencial.

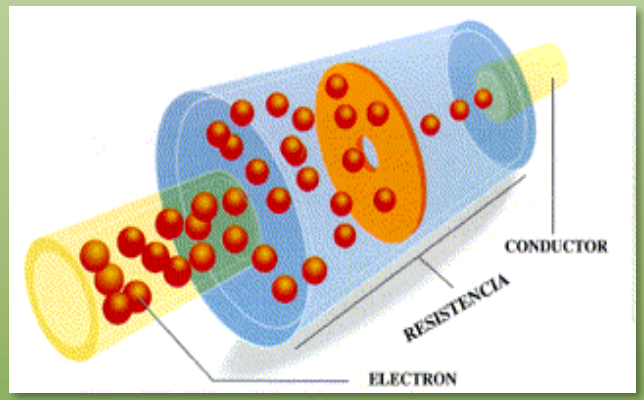
Los materiales que obedecen esta ecuación, siguen **la ley de Ohm:**

$$\Delta V = E\ell \quad \Rightarrow \quad J = \sigma E = \sigma \frac{\Delta V}{\ell}$$

$$\therefore \quad \Delta V = \frac{\ell}{\sigma} J = \left(\frac{\ell}{\sigma A}\right) I = RI$$

Resistencia

La cantidad $R = l/\sigma A$ se conoce como la **resistencia** del conductor que es definida como la relación de la diferencia de potencial aplicada a un conductor entre la corriente que pasa por el mismo:

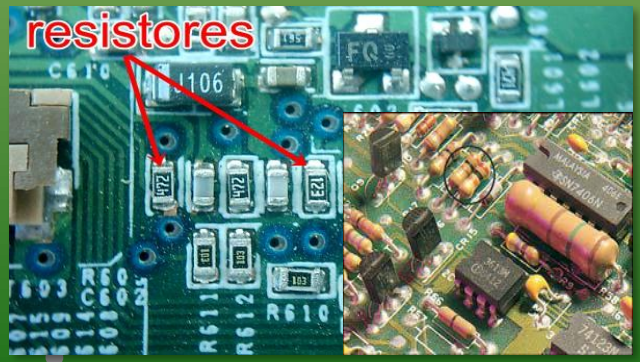


$$R \equiv \frac{\Delta V}{I}$$

La resistencia tiene unidades del SI de volts por ampere. Un volt por ampere se define como un ohm:

$$1\,\Omega \equiv 1\,\mathrm{V/A}$$

La mayoría de los circuitos eléctricos usan elementos llamados resistores para controlar la corriente en las diferentes partes del circuito.

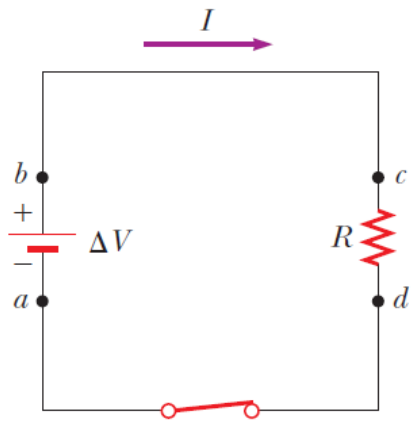


Esta expresión indica que si una diferencia de potencial de $1\,V$ a través de un conductor origina una corriente de $1\,A$, la resistencia del conductor será de $1\,\Omega$.

Por ejemplo, si un aparato doméstico conectado a una fuente de $120\,V$ de diferencia de potencial conduce una corriente de $6\,A$, su resistencia es de $20\,\Omega$.

Potencia Eléctrica

En los circuitos eléctricos típicos, la energía se transfiere de una fuente, como una batería, a algún dispositivo, como sería una lámpara o un receptor de radio. Por ello conviene determinar una expresión que permita calcular la rapidez de transferencia de esta energía.



Circuito constituido por un resistor de resistencia R y una batería con una diferencia de potencial ΔV entre sus terminales. La carga positiva fluye en dirección de las manecillas del reloj.

Suponga que la resistencia de los alambres es tan reducida en comparación con la resistencia del elemento de circuito, así que la energía suministrada a los alambres es despreciable.

La rapidez a la cual el sistema pierde energía potencial eléctrica conforme la carga *Q* pasa a través del resistor es:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{d}{dt}(Q\,\Delta V) = \frac{dQ}{dt}\,\Delta V = I\,\Delta V$$

$\Rightarrow$ $\mathcal{P} = I\,\Delta V$

$\therefore$ $\mathcal{P} = I^2R = \dfrac{(\Delta V)^2}{R}$

DEFINICIONES

La **corriente** eléctrica I en un conductor se define como

$$I \equiv \frac{dQ}{dt}$$

donde dQ es la carga que pasa a través de una sección transversal del conductor en un intervalo de tiempo dt. La unidad del SI para corriente es el **ampere** (A), donde 1 A = 1 C/s.

La **densidad de corriente** J en un conductor es la corriente por unidad de área:

$$J = \frac{I}{A}$$

La **resistencia** R de un conductor se define como

$$R = \frac{\Delta V}{I}$$

donde ΔV es la diferencia de potencial a través de él e I es la corriente que conduce. La unidad del SI para resistencia es volts por ampere, que se define como 1 **ohm** (Ω); es decir: 1 Ω = 1 V/A.

CONCEPTOS Y PRINCIPIOS

La corriente promedio en un conductor se relaciona con el movimiento de los portadores de carga mediante la correspondencia

$$I_{\text{prom}} = nqv_d A$$

donde n es la densidad de portadores de carga, q es la carga en cada portador, v_d es la rapidez de arrastre y A es el área de sección transversal del conductor.

La densidad de corriente en un conductor óhmico es proporcional al campo eléctrico de acuerdo con la expresión

$$J = \sigma E$$

La constante de proporcionalidad σ es la **conductividad** del material del conductor. El inverso de σ se conoce como **resistividad** ρ (esto es, $\rho = 1/\sigma$). La ecuación 27.6 se conoce como **ley de Ohm**, y un material obedece esta ley si la relación de su densidad de corriente a su campo eléctrico aplicado es una constante independiente del campo aplicado.

Para un bloque uniforme de material, con área de sección transversal A y longitud ℓ, la resistencia en toda la longitud ℓ es

$$R = \rho \frac{\ell}{A}$$

donde ρ es la resistividad del material.

En un modelo clásico de conducción eléctrica en metales, los electrones se tratan como moléculas de un gas. En ausencia de un campo eléctrico, la velocidad promedio de los electrones es cero. Cuando se aplica un campo eléctrico, los electrones se mueven (en promedio) con una **velocidad de arrastre** $\vec{\mathbf{v}}_d$ que es opuesta al campo eléctrico. La velocidad de arrastre está dada por

$$\vec{\mathbf{v}}_d = \frac{q\vec{\mathbf{E}}}{m_e}\tau$$

donde q es la carga del electrón, m_e es la masa del electrón y τ es el intervalo de tiempo promedio entre colisiones electrón-átomo. De acuerdo con este modelo, la resistividad del metal es

$$\rho = \frac{m_e}{nq^2\tau}$$

donde n es el número de electrones libres por unidad de volumen.

La resistividad de un conductor varía de manera aproximadamente lineal con la temperatura, de acuerdo con la expresión

$$\rho = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)]$$

donde ρ_0 es la resistividad a cierta temperatura de referencia T_0 y α es el **coeficiente de temperatura de resistividad**.

Si a través de un elemento de circuito se mantiene una diferencia de potencial ΔV, la **potencia**, o proporción a la que se suministra energía al elemento, es

$$\mathcal{P} = I\Delta V$$

Ya que la diferencia de potencial a través de un resistor es conocido por $\Delta V = IR$, la potencia entregada al resistor se expresa como

$$\mathcal{P} = I^2R = \frac{(\Delta V)^2}{R}$$

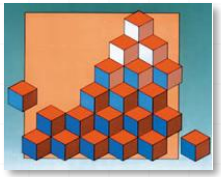
La energía entregada a un resistor por transmisión eléctrica aparece en la forma de energía interna en el resistor.

CURSO de
Electricidad y Magnetismo

FACULTAD de
INGENIERÍA

Circuitos de Corriente Directa

Objetivos de la Lección

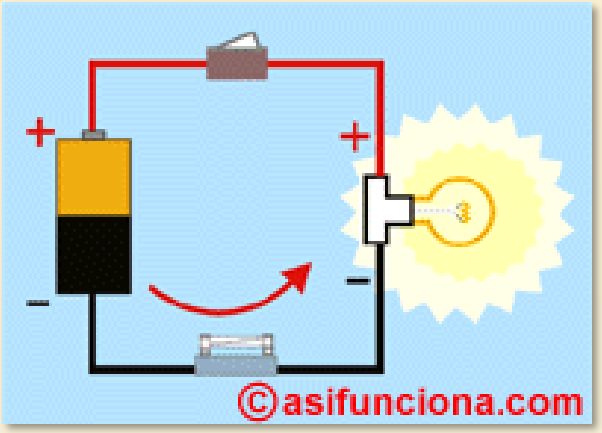


Al terminar esta lección el alumno será capaz de:

- *Definir el concepto de Fuerza Electromotriz.*
- *Identificar la resistencia interna de una batería.*
- *Encontrar la resistencia equivalente en un circuito en serie.*
- *Encontrar la resistencia equivalente en un circuito en paralelo.*
- *Listar las leyes de Kirchhoff.*
- *Aplicar las leyes de Kirchhoff para resolver circuitos.*

Fuerza Electromotriz

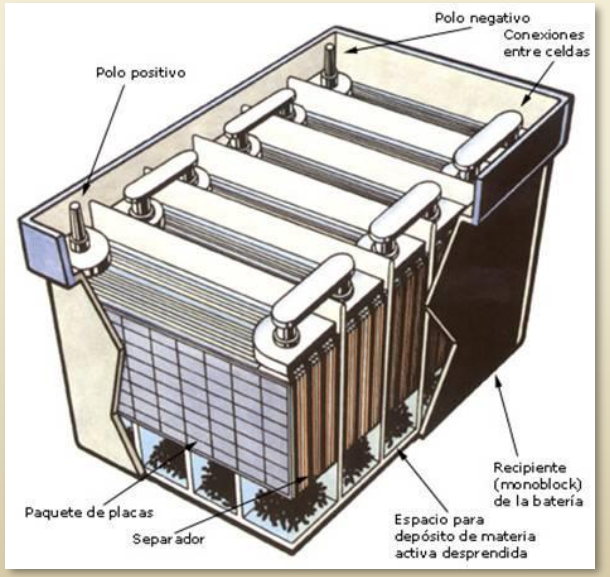
En un circuito en el que la diferencia de potencial en las terminales de la batería es constante, la corriente en el circuito es constante en magnitud y dirección y recibe el nombre de *corriente directa*.

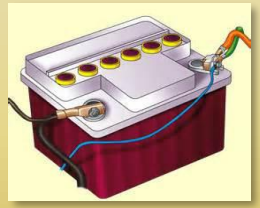


La batería se le conoce como fuente de *fuerza electromotriz (fem)*.

La fem de una batería es el voltaje máximo posible que ésta puede suministrar entre sus terminales.

(Lo que se conoce como fuerza electromotriz es un desafortunado equívoco histórico, pues describe no una fuerza, sino una diferencia de potencial en volts.)



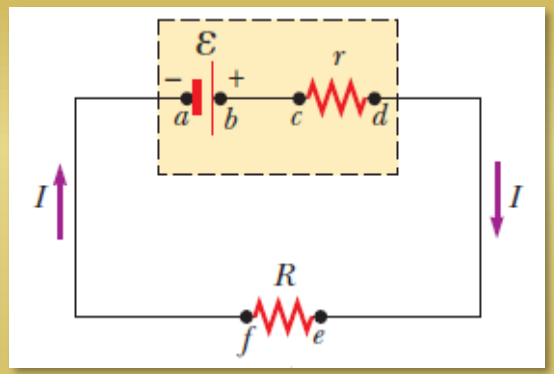


FEM

Cuando existe una diferencia de potencial entre dos puntos, la fuente mueve las cargas "hacia arriba", del potencial más reducido al más elevado.

En forma general se considera que la conexión de alambres en un circuito no tiene resistencia.

Puesto que una batería está hecha de materia, existe una resistencia al flujo de las cargas dentro de la misma, que se conoce como ***resistencia interna*** *y se denota con "r".*



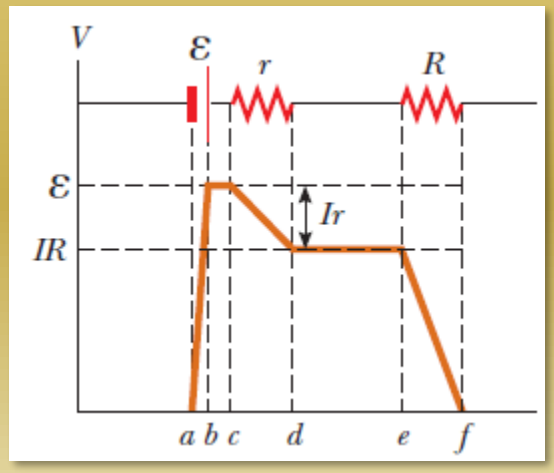
Debido a eso, el voltaje entre las terminales de la batería es:

$$\Delta V = V_d - V_a$$

$$\Delta V = \mathcal{E} - Ir$$

La fem es el voltaje nominal de una batería; por ejemplo, la fem de una pila AA es de 1.5 V.

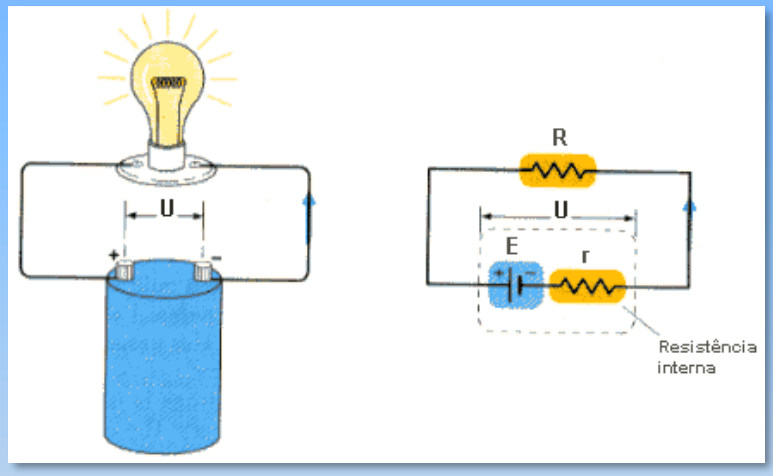
La diferencia de potencial real entre las terminales de la batería depende de la corriente en la misma.



$$I = \frac{V}{R}$$

FEM

El voltaje entre las terminales V debe ser igual a la diferencia de potencial de un extremo a otro de la resistencia externa R, conocida como resistencia de carga.



El resistor representa una carga en la batería porque ésta debe suministrar energía para que el aparato que contiene la resistencia funcione.

La diferencia de potencial de un extremo a otro de la resistencia de carga es: $\Delta V = IR$

$$\mathcal{E} = IR + Ir$$

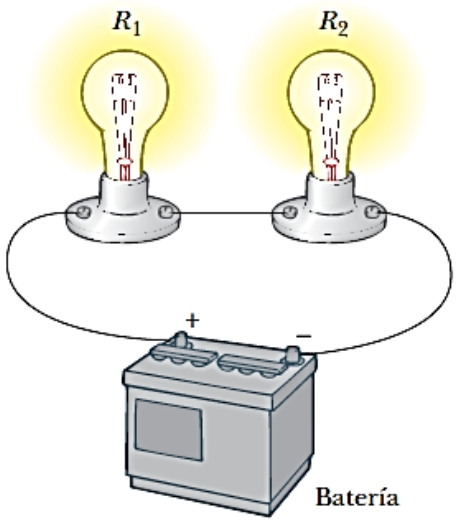
$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

Si R es mucho mayor que r, como es el caso de muchos circuitos útiles en la vida cotidiana, se puede ignorar *r*

Al multiplicar por I se obtiene la potencia: $\mathcal{P} = I\Delta V$

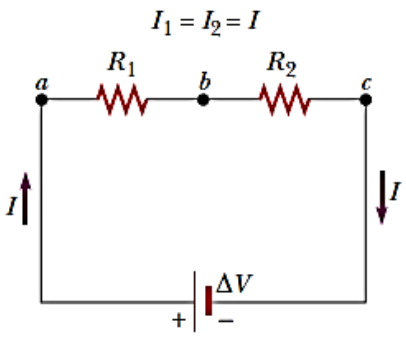
$$I\mathcal{E} = I^2R + I^2r$$

Resistores en Serie

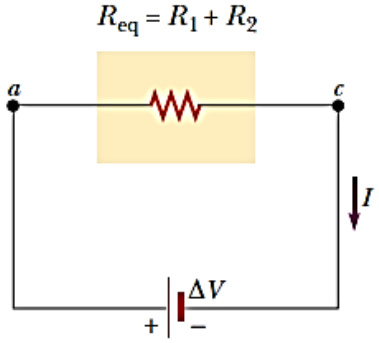


a)

En una conexión en serie, si una cantidad de carga Q sale de un resistor, deberá también entrar en el segundo resistor.



b)



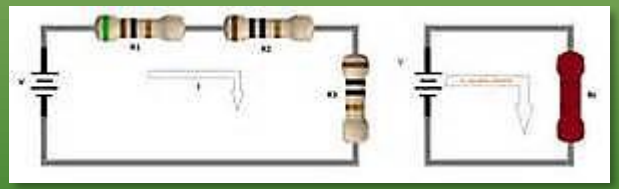
c)

a) Combinación en serie de dos lámparas de resistencias R_1 y R_2. b) Diagrama de circuito para un circuito de dos resistores. La corriente en R_1 es la misma que en R_2. c) Los resistores han sido reemplazados por un solo resistor de resistencia equivalente $R_{eq} = R_1 + R_2$.

La diferencia de potencial que se aplica a una combinación en serie de resistores se dividirá entre éstos.

$$\Delta V = I_1 R_1 + I_2 R_2$$

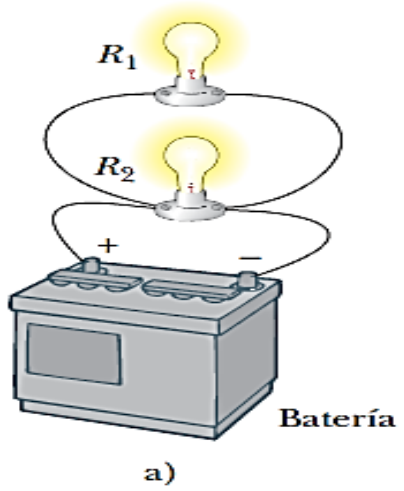
$$\Delta V = I R_{eq}$$



La resistencia equivalente de tres o más resistores conectados en serie es:

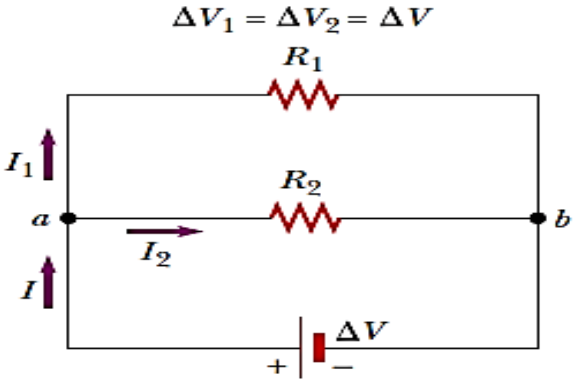
$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots$$

Resistores en Paralelo

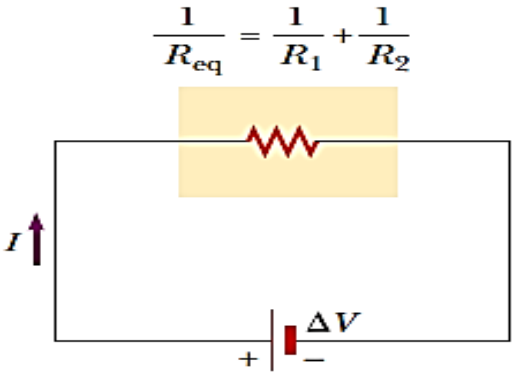


a)

Las diferencias de potencial a través de los resistores son las mismas:



b)



c)

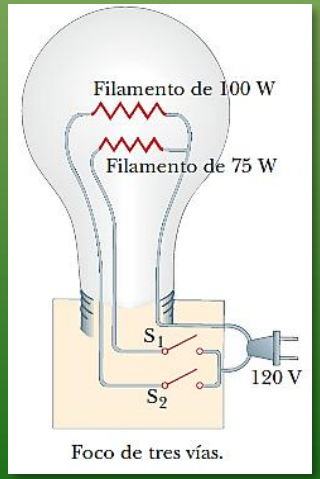
a) Combinación en paralelo de dos lámparas con resistencias R_1 y R_2. b) Diagrama de circuito para un circuito de dos resistores. La diferencia de potencial en las terminales de R_1 es la misma que la aplicada a R_2. c) Los resistores han sido reemplazados por un solo resistor de resistencia equivalente

La corriente en la resistencia equivalente es:

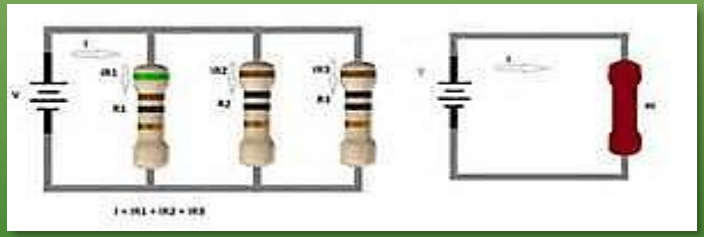
$$I = \frac{\Delta V}{R_{eq}}$$

La resistencia equivalente de dos resistores en paralelo es:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$



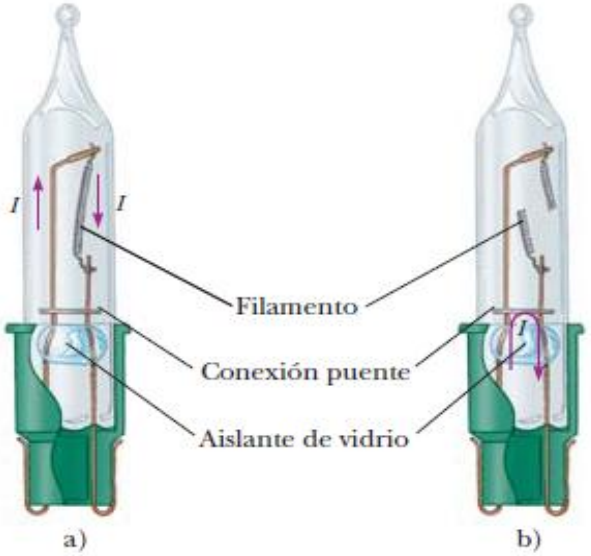
Foco de tres vías.



La resistencia equivalente de tres o más resistores conectados en paralelo es:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots$$

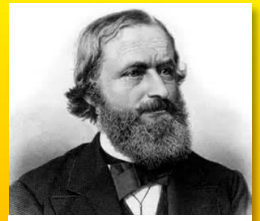
Resistores en Paralelo



a) Diagrama esquemático de un foco "miniatura", con una conexión puente para proporcionar una ruta de corriente si el filamento se rompe. Cuando el filamento está intacto, las cargas fluyen en el mismo. b) Un foco con el filamento roto. En este caso, las cargas fluyen en el puente. c) Foco de árbol de Navidad.

Cuando el filamento falla y a través del foco aparecen 120 V, un arco quema el aislamiento del puente y conecta las patas del filamento. Ahora esta conexión completa el circuito a través del foco, aun cuando su filamento ya no esté activo.

Todos los otros focos no sólo permanecen encendidos, sino que brillan con más intensidad porque la resistencia total de la tira se reduce y en consecuencia la corriente en cada foco aumenta.



GUSTAV KIRCHHOFF
Físico alemán (1824-1887)

Leyes de Kirchhoff

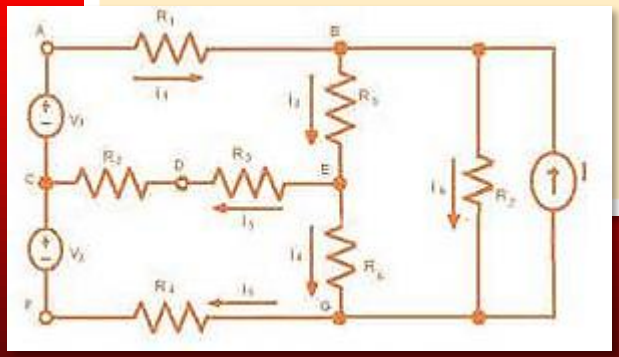
Se mencionó en en la sección anterior, que es posible simplificar y explicar combinaciones de resistores aplicando la expresión $\Delta V = IR$ y las reglas para las combinaciones en serie y en paralelo de los resistores. Muy a menudo, sin embargo, no es posible simplificar un circuito en una sola espira. El procedimiento para explicar circuitos más complejos se hace posible si se utilizan dos principios conocidos como **leyes de Kirchhoff:**

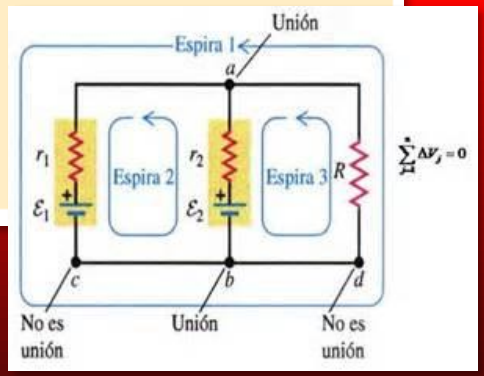
1. **Ley de la unión.** En cualquier unión, la suma de las corrientes debe ser igual a cero:

$$\sum_{\text{unión}} I = 0$$

2. **Ley de la espira.** La suma de las diferencias de potencial a través de todos los elementos alrededor de cualquier espira de un circuito cerrado debe ser igual a cero:

$$\sum_{\substack{\text{espira} \\ \text{cerrada}}} \Delta V = 0$$

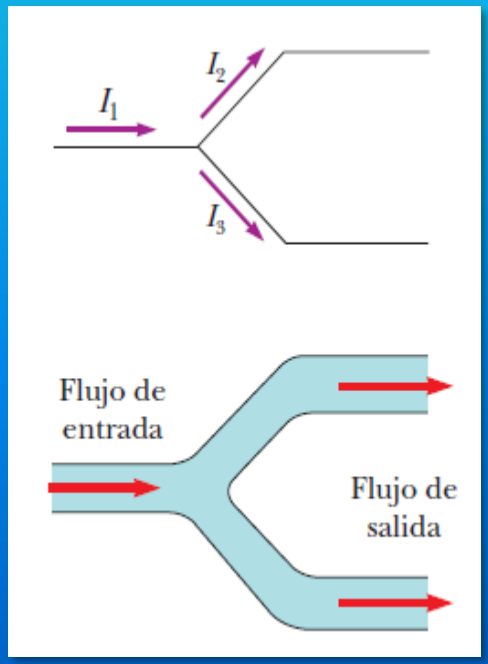




Primera Ley de Kirchhoff

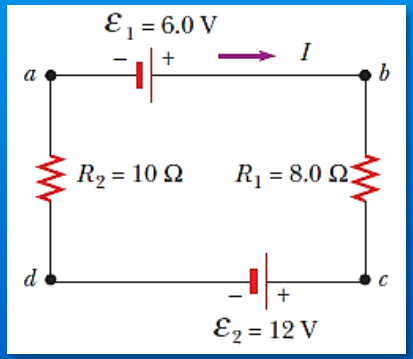
La primera ley de Kirchhoff es un enunciado de la conservación de la carga eléctrica. Todas las cargas que entran en un punto dado en un circuito deben abandonarlo porque la carga no puede acumularse en ese punto. Las corrientes dirigidas hacia dentro de la unión participan en la ley de la unión como $+I$, mientras que las corrientes que salen de una unión están participando con $-I$. Si aplica esta ley a la unión que se muestra en la figura , obtiene

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$



Circuito de una sola espira

Un circuito de una sola espira contiene dos resistores y dos baterías, como se muestra en la figura. (Desprecie las resistencias internas de las baterías.) Encuentre la corriente en el circuito.



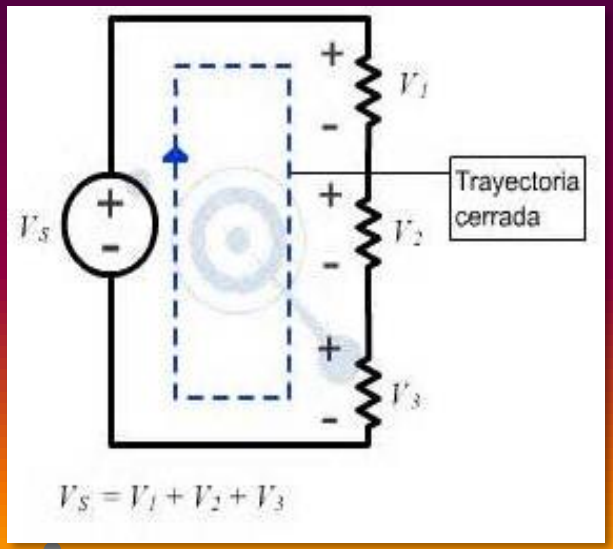
$$\sum \Delta V = 0 \quad \rightarrow \quad \mathcal{E}_1 - IR_1 - \mathcal{E}_2 - IR_2 = 0$$

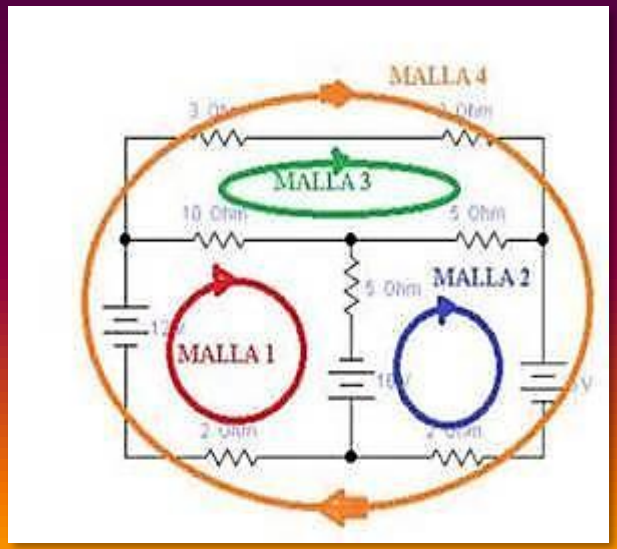
$$I = \frac{\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2}{R_1 + R_2} = \frac{6.0\ \text{V} - 12\ \text{V}}{8.0\ \Omega + 10\ \Omega} = -0.33\ \text{A}$$

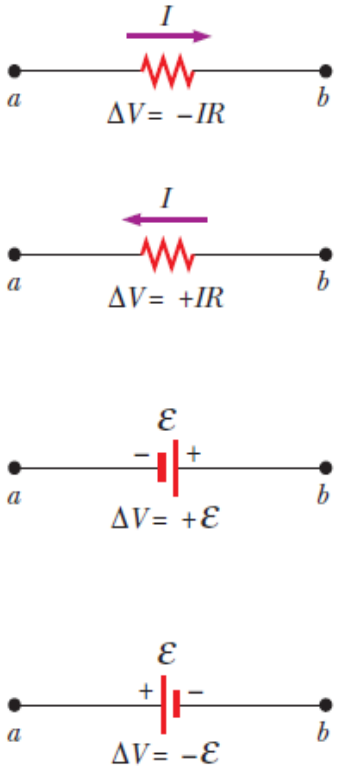
Segunda Ley de Kirchhoff

La segunda ley de Kirchhoff es una consecuencia de la ley de conservación de energía. Imagine que mueve una carga alrededor de una espira de circuito cerrado. Cuando la carga regresa al punto de partida, el sistema carga–circuito debe tener la misma energía total que la que tenía antes de mover la carga.

La energía potencial se reduce cada vez que la carga se mueve durante una caída de potencial –IR en un resistor o cada vez que se mueve en dirección contraria a causa de una fuente de fem. La energía potencial aumenta cada vez que la carga pasa a través desde la terminal negativa a la positiva en una batería.



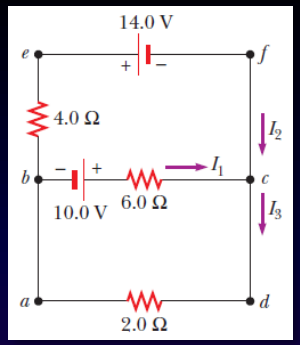




Reglas para determinar las diferencias de potencial a través de un resistor y de una batería. (El supuesto es que la batería no tiene resistencia interna.) Cada elemento del circuito se recorre de *a* hasta *b*, de izquierda a derecha.

Un circuito de varias espiras

Encuentre las corrientes I1, I2 e I3 en el circuito que se muestra en la figura.



Aplique la ley de la unión de Kirchhoff a la unión c:

$$1) \quad I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

Ahora tiene una ecuación con tres incógnitas: I_1, I_2 e I_3. Existen tres espiras en el circuito: *abcda*, *befcb* y *aefda*. Sólo necesita dos ecuaciones de espira para determinar las corrientes desconocidas. (La tercera ecuación de espira no daría nueva información.) Elija recorrer estas espiras en la dirección de las manecillas del reloj. Aplique la ley de la espira de Kirchhoff a las espiras *abcda* y *befcb*:

abcda: $$2) \quad 10.0\ \text{V} - (6.0\ \Omega)I_1 - (2.0\ \Omega)I_3 = 0$$

befcb: $$-(4.0\ \Omega)I_2 - 14.0\ \text{V} + (6.0\ \Omega)I_1 - 10.0\ \text{V} = 0$$

$$3) \quad -24.0\ \text{V} + (6.0\ \Omega)I_1 - (4.0\ \Omega)I_2 = 0$$

Resuelva la ecuación 1) para I_3 y sustituya en la ecuación 2):

$$10.0\ \text{V} - (6.0\ \Omega)I_1 - (2.0\ \Omega)\ (I_1 + I_2) = 0$$

$$4) \quad 10.0\ \text{V} - (8.0\ \Omega)I_1 - (2.0\ \Omega)I_2 = 0$$

Multiplique cada término en la ecuación 3) por 4 y cada término en la ecuación 4) por 3:

$$5) \quad -96.0\ \text{V} + (24.0\ \Omega)I_1 - (16.0\ \Omega)I_2 = 0$$

$$6) \quad 30.0\ \text{V} - (24.0\ \Omega)I_1 - (6.0\ \Omega)I_2 = 0$$

Sume la ecuación 6) a la ecuación 5) para eliminar I_1 y encontrar I_2:

$$-66.0\ \text{V} - (22.0\ \Omega)I_2 = 0$$

$$I_2 = -3.0\ \text{A}$$

Use este valor de I_2 en la ecuación 3) para encontrar I_1:

$$-24.0\ \text{V} + (6.0\ \Omega)I_1 - (4.0\ \Omega)(-3.0\ \text{A}) = 0$$

$$-24.0\ \text{V} + (6.0\ \Omega)I_1 + 12.0\ \text{V} = 0$$

$$I_1 = 2.0\ \text{A}$$

Use la ecuación 1) para encontrar I_3:

$$I_3 = I_1 + I_2 = 2.0\ \text{A} - 3.0\ \text{A} = -1.0\ \text{A}$$

CONCEPTOS Y PRINCIPIOS

La **resistencia equivalente** de un conjunto de resistores conectados en una **combinación en serie** es

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots$$

La **resistencia equivalente** de un conjunto de resistores conectados en una combinación en **paralelo** se encuentra partiendo de la correspondencia

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots$$

Los circuitos que involucran más de una espira se analizan convenientemente con el uso de las **reglas de Kirchhoff:**

1. **Regla de la unión.** En cualquier unión, la suma de las corrientes debe ser igual a cero:

$$\sum_{\text{nodo}} I = 0$$

2. **Regla de la espira.** La suma de las diferencias de potencial a través de todos los elementos alrededor de cualquier espira de circuito debe ser cero:

$$\sum_{\text{malla cerrada}} \Delta V = 0$$

Cuando un resistor se recorre en la dirección de la corriente, la diferencia de potencial ΔV a través del resistor es $-IR$. Cuando un resistor se recorre en la dirección opuesta a la corriente, $\Delta V = +IR$. Cuando una fuente de fem se recorre en la dirección de la fem (terminal negativa a terminal positiva), la diferencia de potencial es $+\mathcal{E}$. Cuando una fuente de fem se recorre opuesta a la fem (positivo a negativo), la diferencia de potencial es $-\mathcal{E}$.

Si un capacitor se carga con una batería a través de un resistor de resistencia R, la carga en el capacitor y la corriente en el circuito varían en el tiempo de acuerdo con las expresiones

$$q(t) = Q(1 - e^{-t/RC})$$

$$I(t) = \frac{\mathcal{E}}{R} e^{-t/RC}$$

donde $Q = C\mathcal{E}$ es la máxima carga en el capacitor. El producto RC se llama **constante de tiempo** τ del circuito.

Si un capacitor cargado se descarga a través de un resistor de resistencia R, la carga y la corriente disminuyen exponencialmente en el tiempo de acuerdo con las expresiones

$$q(t) = Qe^{-t/RC}$$

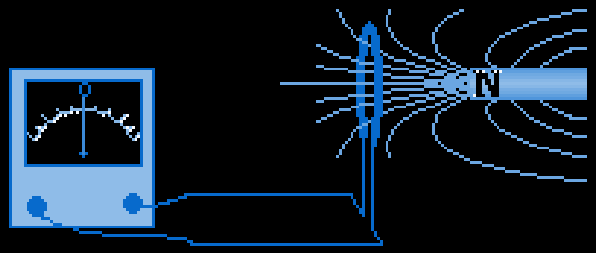
$$I(t) = -I_i e^{-t/RC}$$

donde Q es la carga inicial en el capacitor e $I_i = Q/RC$ es la corriente inicial en el circuito.

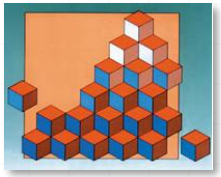
CURSO de
Electricidad y Magnetismo

FACULTAD de
INGENIERÍA

Campos Magnéticos



Objetivos de la Lección



Al terminar esta lección el alumno será capaz de:

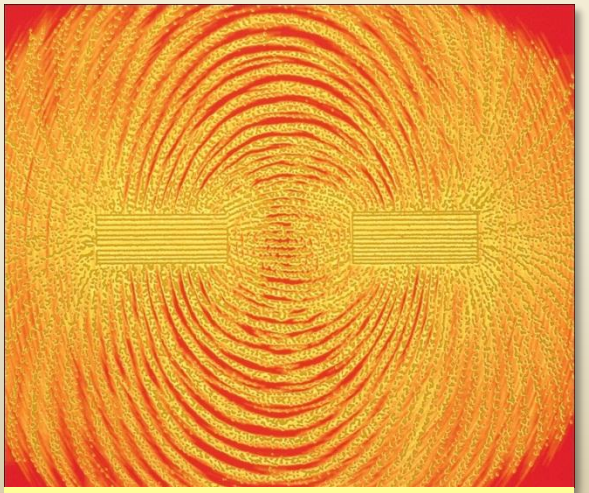
- *Definir el concepto de Campo Magnético.*
- *Listar los diferentes tipos de sustancias magnéticas.*
- *Identificar fuerza que ejerce un campo magnético sobre una corriente.*
- *Calcular el momento magnético sobre una espira.*
- *Cuantificar el campo magnético generado por una corriente.*
- *Identificar las Leyes de Ampere, Faraday y Lenz.*

MAGNETISMO E IMANES

- Sustancias magnéticas: aquellas que son atraídas por la magnetita.
- Pueden convertirse en imanes mediante diferentes formas de imantación:

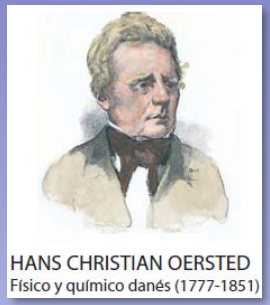
Si se frotan con magnetita → imanes artificiales → { temporales; permanentes }

Si se someten a una corriente eléctrica → imanes artificiales temporales o electroimanes → { temporales; permanentes }



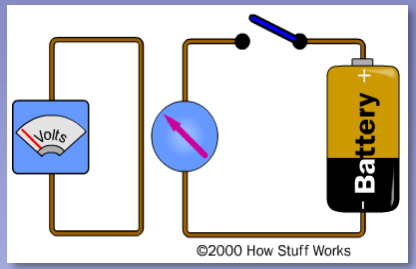
Líneas de fuerza magnética

- Se pueden visualizar las líneas magnéticas de un imán, espolvoreando limaduras de hierro sobre una cartulina situada sobre él.

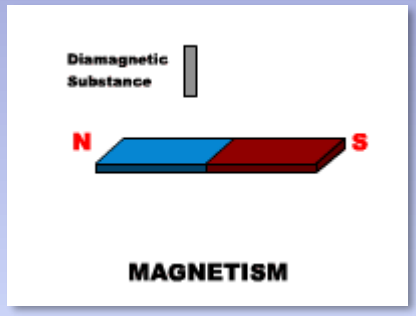


HANS CHRISTIAN OERSTED
Físico y químico danés (1777-1851)

Polos Magnéticos



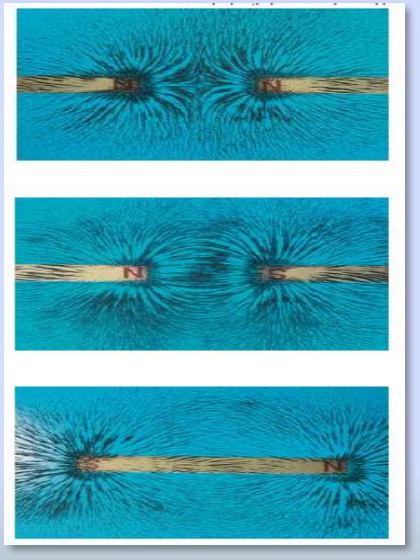
Todo imán, cualquiera que sea su forma, tiene dos polos, uno norte (N) y otro sur (S), que ejercen fuerzas sobre otros polos magnéticos de manera similar a como las cargas eléctricas ejercen fuerzas entre sí.



- Los polos de distinto nombre se atraen y aquellos del mismo nombre se repelen.

Esto es, polos iguales (N-N o S-S) se repelen

y polos opuestos (N-S) se atraen.



Los polos magnéticos ejercen entre sí fuerzas de atracción o de repulsión que varían en función del inverso del cuadrado de la distancia.

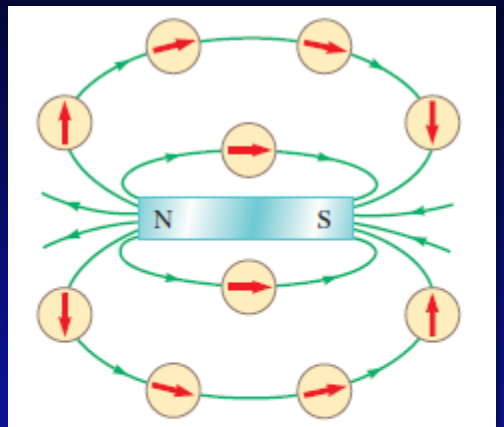
Los polos magnéticos siempre se encuentran en pares.

- Es imposible separar los polos de un imán.

Campos y Fuerzas Magnéticas

Es posible definir un campo magnético $\vec{\mathbf{B}}$ en algún punto en el espacio en función de la fuerza magnética $\vec{\mathbf{F}}_B$ que ejerce el campo sobre una partícula con carga que se mueve con una velocidad $\vec{\mathbf{v}}$, misma que se identifica como el objeto de prueba. Por ahora, suponga que no existen ni campo eléctrico ni campo gravitacional en la ubicación del objeto de prueba. Los experimentos efectuados en diferentes partículas con carga que se mueven en un campo magnético, dan los siguientes resultados:

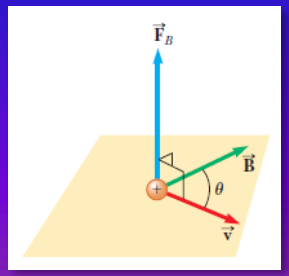
- La magnitud F_B de la fuerza magnética ejercida sobre la partícula es proporcional a la carga q y a la rapidez v de dicha partícula.
- Cuando una partícula con carga se mueve paralela al vector de campo magnético, la fuerza magnética que actúa sobre ella es igual a cero.
- Cuando el vector de velocidad de la partícula forma un ángulo $\theta \neq 0$ con el campo magnético, la fuerza magnética actúa en dirección perpendicular tanto a $\vec{\mathbf{v}}$ como a $\vec{\mathbf{B}}$; $\vec{\mathbf{F}}_B$ es perpendicular al plano formado por $\vec{\mathbf{v}}$ y $\vec{\mathbf{B}}$.
- La fuerza magnética ejercida sobre una carga positiva tiene dirección opuesta a la dirección de la fuerza magnética ejercida sobre una carga negativa que se mueva en la misma dirección.
- La magnitud de la fuerza magnética que se ejerce sobre una partícula en movimiento es proporcional a sen θ, donde θ es el ángulo que el vector de velocidad de la partícula forma con la dirección de $\vec{\mathbf{B}}$.

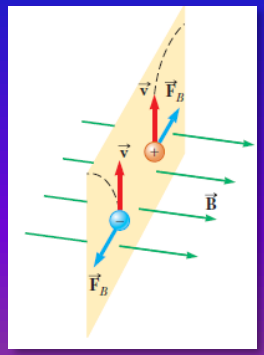


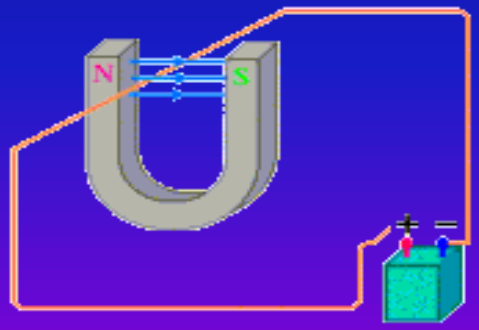
Con la aguja de la brújula pueden trazarse las líneas de campo magnético en la región externa de un imán de barra.

$$\vec{\mathbf{F}}_B = q\vec{\mathbf{v}} \times \vec{\mathbf{B}}$$

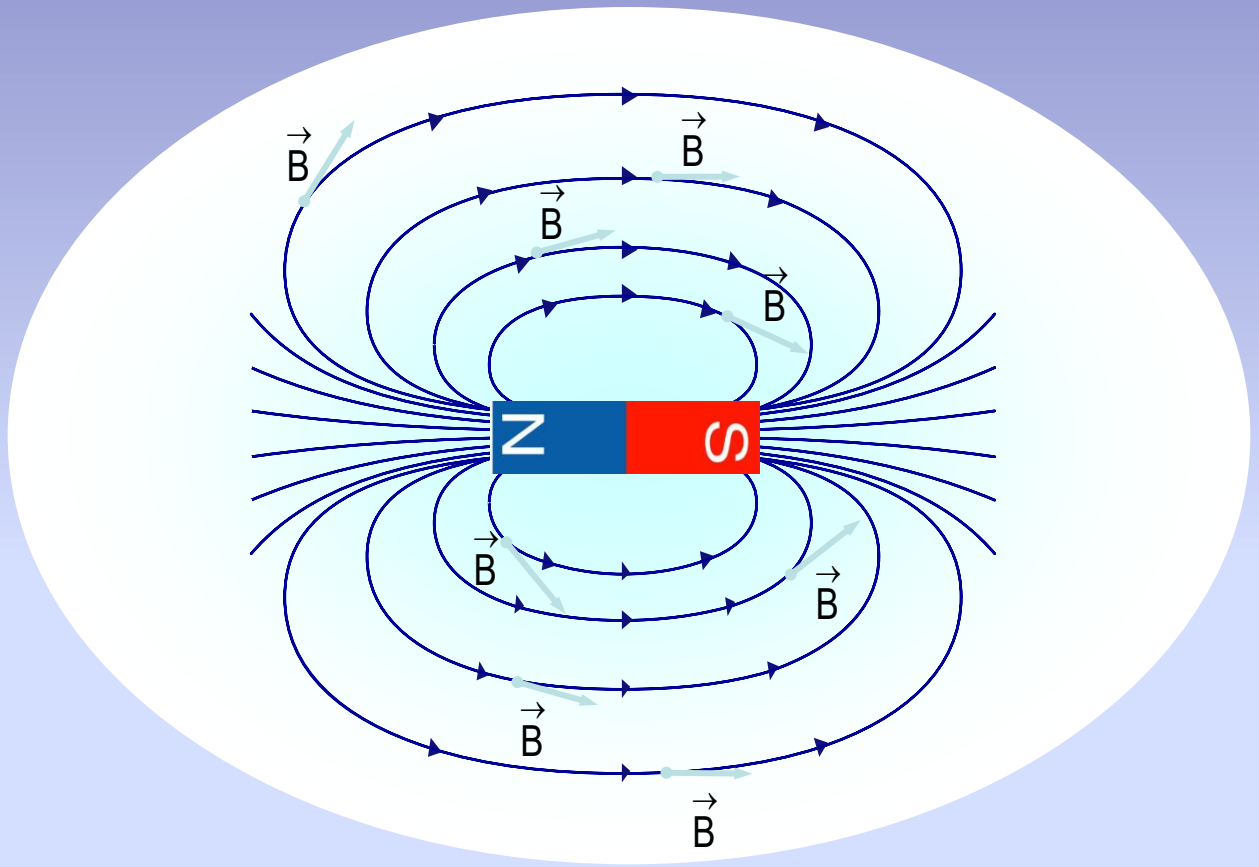
$$F_B = |q| vB \operatorname{sen} \theta$$







- Se dice que un imán produce un campo magnético en el espacio que lo rodea si al colocar pequeños trozos de hierro próximos a él, los atrae



Línea de campo magnético es el camino que seguiría un polo norte dentro del campo.

Representación simbólica

Hacia fuera del papel

• • • •
• • • •
• • • •

Hacia dentro del papel

× × × ×
× × × ×
× × × ×

Las líneas de fuerza del campo magnético van de norte a sur

- Campo magnético uniforme: aquel en el que la intensidad de $\vec{B}$ es la misma en todos los puntos.

FUERZA QUE EJERCE EL CAMPO MAGNÉTICO SOBRE UN ELEMENTO DE CORRIENTE

CARGA ELÉCTRICA DENTRO DE UN CAMPO MAGNÉTICO UNIFORME

LEY DE LORENTZ

Carga eléctrica en un campo magnético →

- en reposo → no se observa ninguna interacción entre ambos
- en movimiento → se manifiesta una fuerza magnética sobre ella proporcional al valor de la carga y a su velocidad

- Se define un vector $\vec{B}$, denominado inducción magnética, en cada punto del espacio mediante la relación: $\vec{F} = q\,(\vec{V} \times \vec{B})$

- Si α es el ángulo que forman los vectores $\vec{v}$ y $\vec{B}$ en un punto del espacio, el módulo de la fuerza que actúa sobre la carga q en ese punto es: **F = q v B sen α**

Si

- $\alpha = 0 \Rightarrow F = 0$ (si la carga se introduce paralela a $\vec{B}$)
- $\alpha = 90 \Rightarrow F = F_{máx}$

- Sea una carga positiva con velocidad $\vec{v}$ que penetra en una campo magnético de inducción magnética $\vec{B}$. Según la posición relativa de ambos vectores, se pueden presentar tres casos:

- Los vectores $\vec{v}$ y $\vec{B}$ sean paralelos
- Los vectores $\vec{v}$ y $\vec{B}$ sean perpendiculares
- Los vectores $\vec{v}$ y $\vec{B}$ formen entre sí un ángulo cualquiera α

Si $\vec{v}$ es paralela a $\vec{B}$

$F = q\ v\ B\ \text{sen}\ 0 = 0 \Rightarrow F = 0 \Rightarrow$

la partícula se moverá con **MRU mantiene al velocidad y dirección que llevaba porque el campo no le afecta.**

Si $\vec{v}$ es perpendicular a $\vec{B}$

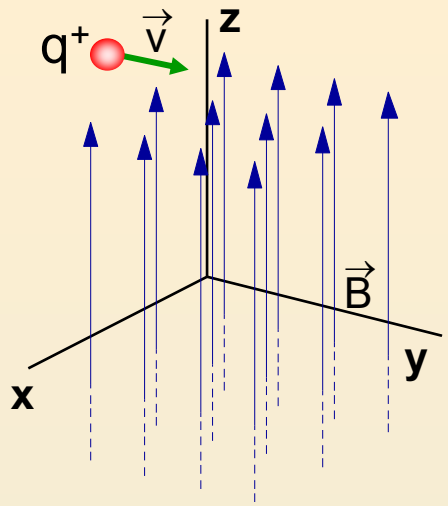
$F = q\ v\ B\ \text{sen}\ 90 = 0 \Rightarrow F = q\ v\ B \Rightarrow$

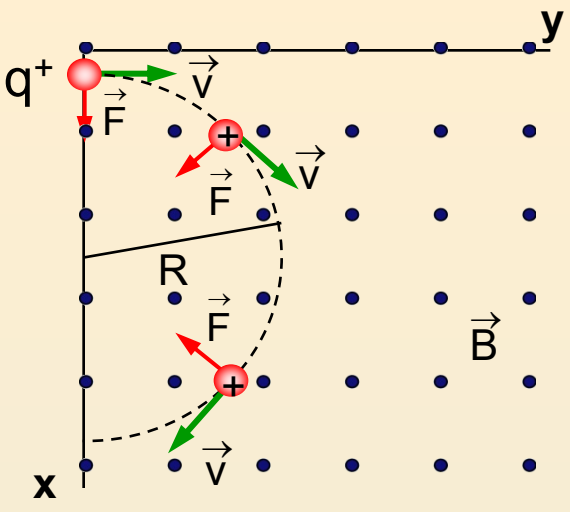
La partícula se desplazará con **MCU ya que el producto vectorial hace que la fuerza salga perpendicular a la trayectoria**

$$F = \frac{m\ v^2}{R} = q v B \Rightarrow R = \frac{m v}{q B}$$

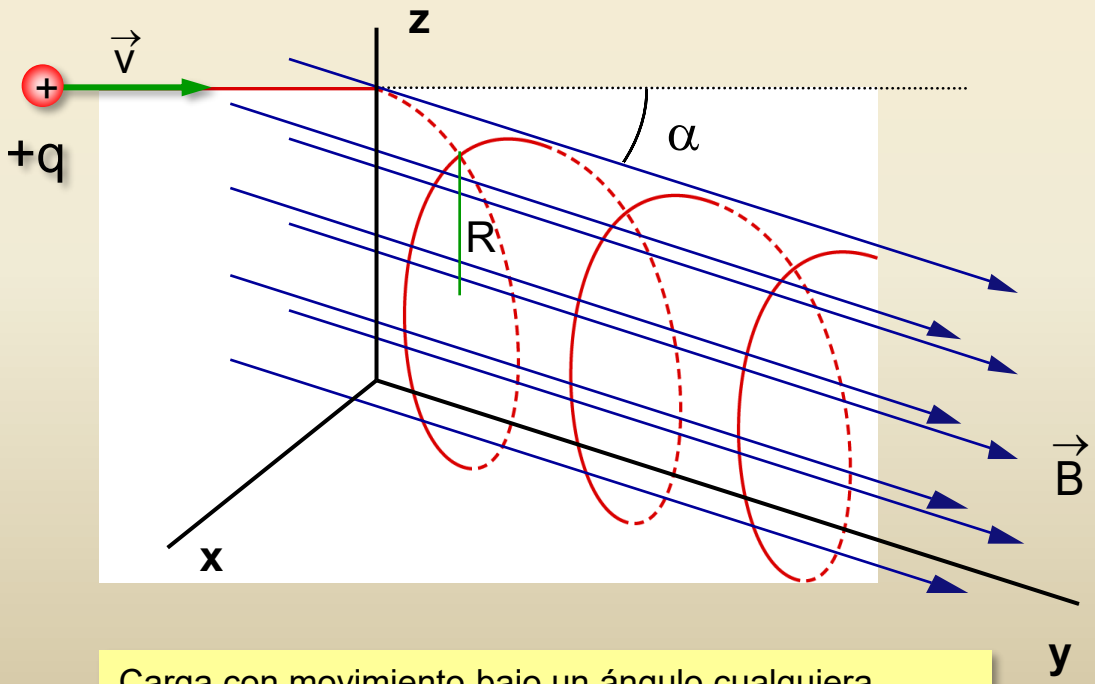
siendo R el radio de la trayectoria circular

$$\Rightarrow T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$$





Si $\vec{v}$ y $\vec{B}$ forman un ángulo cualquiera α



Carga con movimiento bajo un ángulo cualquiera

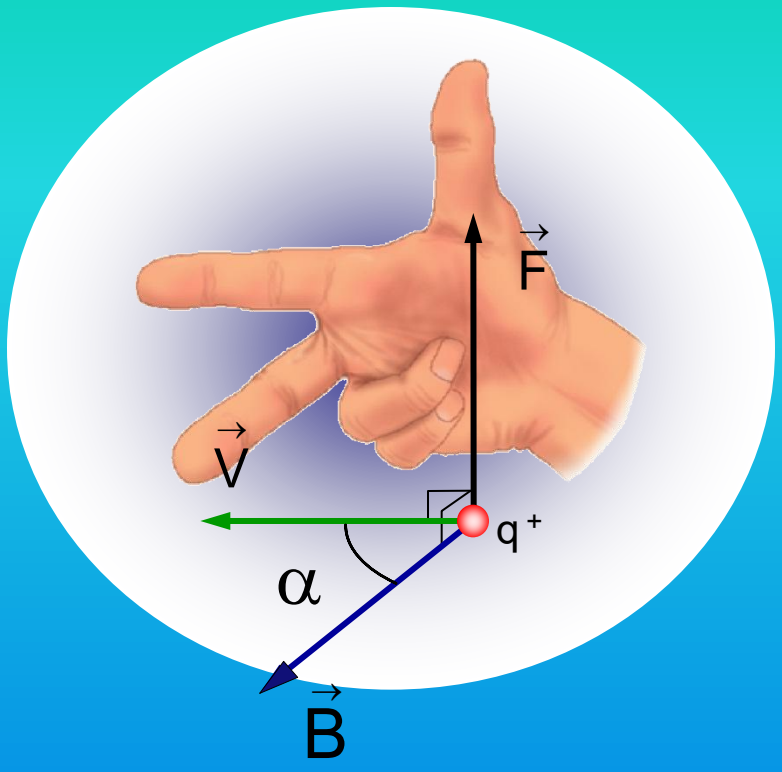
$$F = q\ v\ B\ \text{sen}\ \alpha$$

$$R = \frac{m\ v\ \text{sen}\,\alpha}{B\,q}$$

La partícula seguirá una trayectoria helicoidal

UNIDADES DE MEDIDA DEL CAMPO MAGNÉTICO O INDUCCIÓN MAGNÉTICA

- La unidad de inducción magnética en el S.I. es el tesla (T)
- Un tesla es el valor de la inducción magnética de un campo que ejerce una fuerza de 1 N sobre una carga eléctrica de 1 C que se mueve con una velocidad de 1m/s perpendicular al campo



Fuerza sobre una carga eléctrica positiva en un campo magnético

$$\vec{F} = q\,(\vec{V} \times \vec{B})$$

- Si una carga eléctrica q se encuentra en una región del espacio en la que coexisten un campo eléctrico de intensidad $\vec{E}$ y un campo magnético $\vec{B}$, actuarán sobre la carga una fuerza eléctrica $q\vec{E}$ y una fuerza $q(\vec{V} \times \vec{B})$ debida al campo magnético

- La fuerza total sobre la carga será la suma de ambas:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q(\vec{V} \times \vec{B})$$

Fuerza que actúa sobre una carga eléctrica en un espacio donde coexisten un campo eléctrico y un campo magnético es:

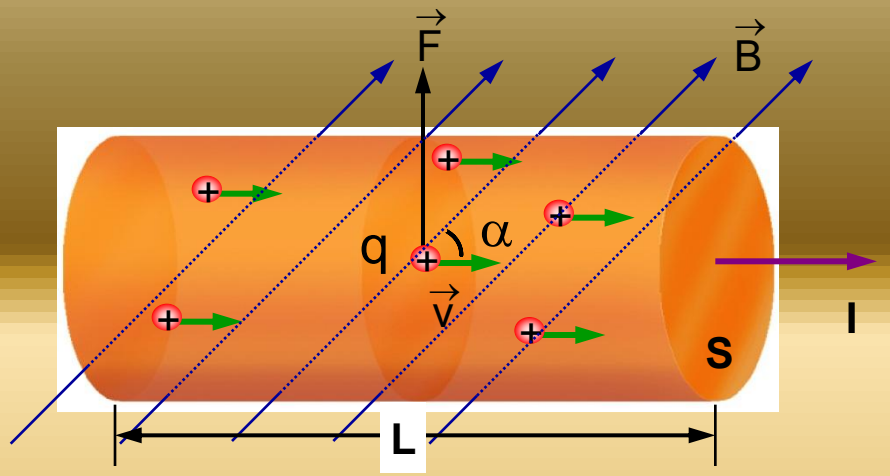
$$\vec{F} = q\vec{E} + q(\vec{V} \times \vec{B})$$

Fuerza magnética sobre un conductor rectilíneo

- Sea un conductor rectilíneo de longitud $L = v\,\Delta t$ y sección S, por el que circula una intensidad de corriente I

- Siendo Δq la carga total que atraviesa S en un tiempo Δt, la intensidad de corriente es:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$



Segmento de conductor rectilíneo de longitud L y sección S

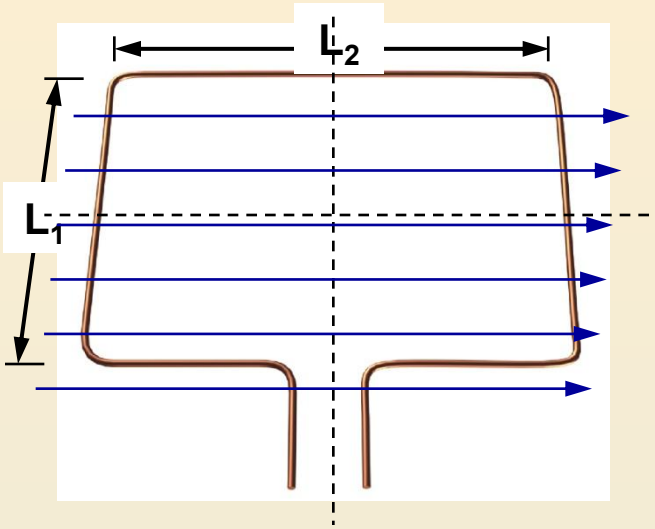
- La fuerza de Lorentz sobre la carga es:

$F = \Delta q\, v\, B \operatorname{sen}\alpha = (I\,\Delta t)\, v\, B \operatorname{sen}\alpha = I\,(v\,\Delta t)\, B \operatorname{sen}\alpha \Rightarrow$ $F = I\, L\, B \operatorname{sen}\alpha$

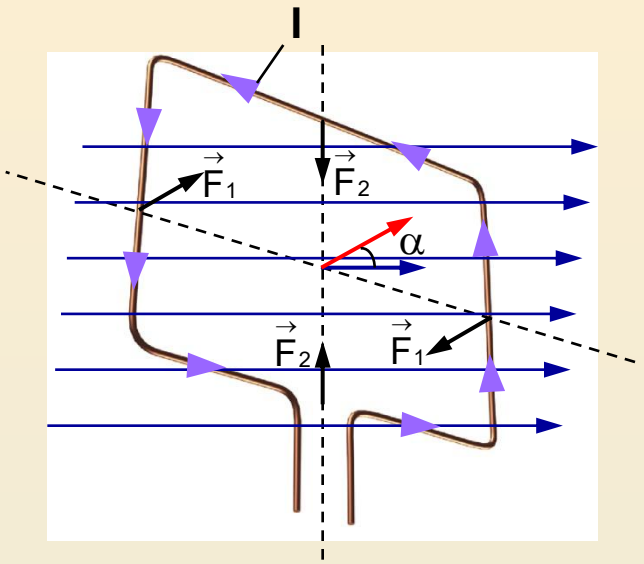
- La fuerza magnética sobre un conductor rectilíneo de longitud L por el que circula una corriente I situado en un campo magnético $\vec{B}$ es:

$$\vec{F} = I\,(\vec{L} \times \vec{B})$$

Momento del campo magnético sobre una espira



Par de fuerzas sobre una espira rectangular



- Las fuerzas magnéticas sobre los lados L_2 de la espira $\vec{F}_2 = I\,(\vec{L}_2 \times \vec{B})$ son iguales en módulo y de sentidos opuestos, y se anulan entre sí.

- Lo mismo ocurre sobre los lados L_1 de la espira, pero su línea de acción es distinta, formando un par de fuerzas que produce un giro.

- El momento del par de fuerzas sobre la espira es $M = I\,L_1\,B\,.\,L_2 \operatorname{sen}\alpha = I\,S\,B \operatorname{sen}\alpha$

$\vec{M} = I\,(\vec{S} \wedge \vec{B}) = \vec{m} \wedge \vec{B}$ siendo $\vec{m}$ el momento magnético.

Galvanómetro de cuadro móvil

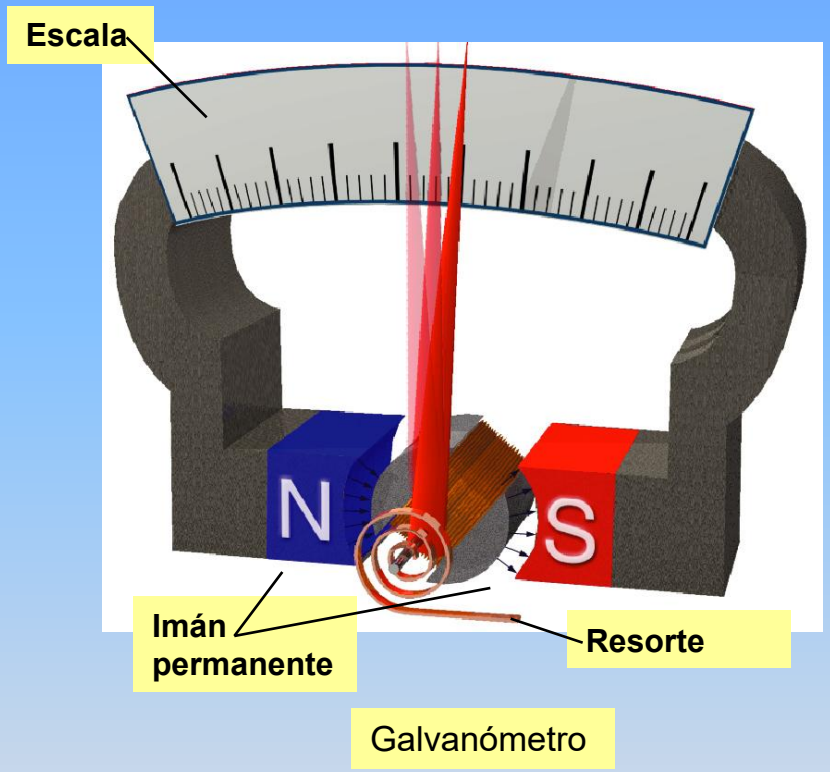
- Es un aparato que mide la intensidad de la corriente eléctrica

- Es el fundamento de los amperímetros y voltímetros

- Consta de una bobina situada en un campo magnético radial formando siempre entre ambos un ángulo recto

- Al circular la corriente por la bobina se genera un par de fuerzas que la hace girar, siendo proporcional al ángulo girado

- La bobina se detiene cuando ambos pares son iguales

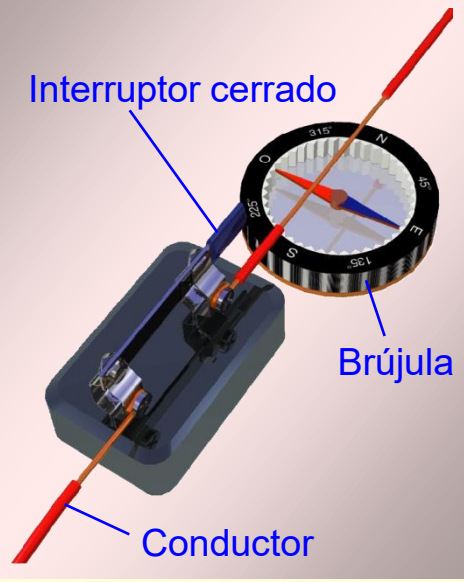


Galvanómetro

EL EXPERIMENTO DE OERSTED

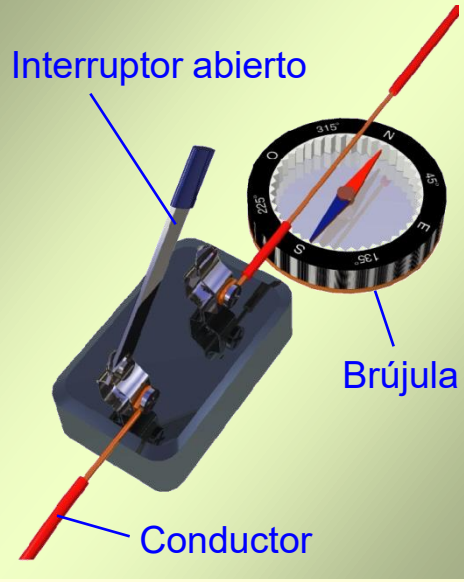
- En 1820 Hans Christian Oersted demostró experimentalmente los efectos de una corriente eléctrica sobre una corriente imantada

CIRCUITO CERRADO



Situó la aguja paralela a un conductor rectilíneo. Observó que giraba hasta quedar perpendicular al conductor cuando circulaba por él una corriente eléctrica

CIRCUITO ABIERTO



La aguja volvía a su posición inicial al cesar la corriente eléctrica. El paso de la corriente ejercía sobre la aguja imantada los mismos efectos que un imán

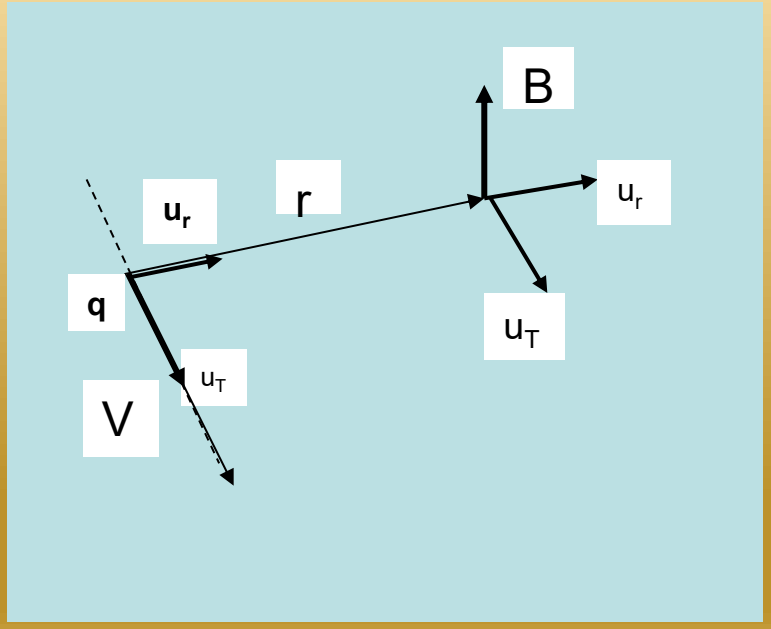
1-LAS CARGAS ELÉCTRICAS EN MOVIMIENTO CREAN CAMPOS MAGNÉTICOS

Cuando una carga eléctrica está en reposo genera un campo eléctrico (electrostático=carga en reposo) pero si la carga se mueve genera a la vez un campo eléctrico y uno magnético con lo que podemos decir que los campos magnéticos son una parte de los campos eléctricos que aparecen cuando las cargas se mueven

Ecuación de Ampere y Laplace: $\vec{B} = \frac{\mu.}{4\pi.}\frac{q.v}{r^2}(\vec{u}_T x \vec{u}_r)$ TESLA

en el vacío queda:

$$\vec{B} = 10^{-7}.\frac{q.v}{r^2}(\vec{u}_T x \vec{u}_r)$$



Es interesante observar que el campo magnético, igual que ocurría con el eléctrico depende del medio y esta dependencia se manifiesta por los diferentes valores que toma la constante magnética según el medio. También se puede definir una constante magnética en el vacío **Km=10^{-7}**

Igual que ocurría con el campo gravitatorio y el eléctrico, el campo magnético disminuye con el cuadrado de la distancia a la fuente que genera el campo (en este caso una carga en movimiento) en módulo la intensidad de campo queda :

$$K_m = \frac{\mu}{4\pi}$$

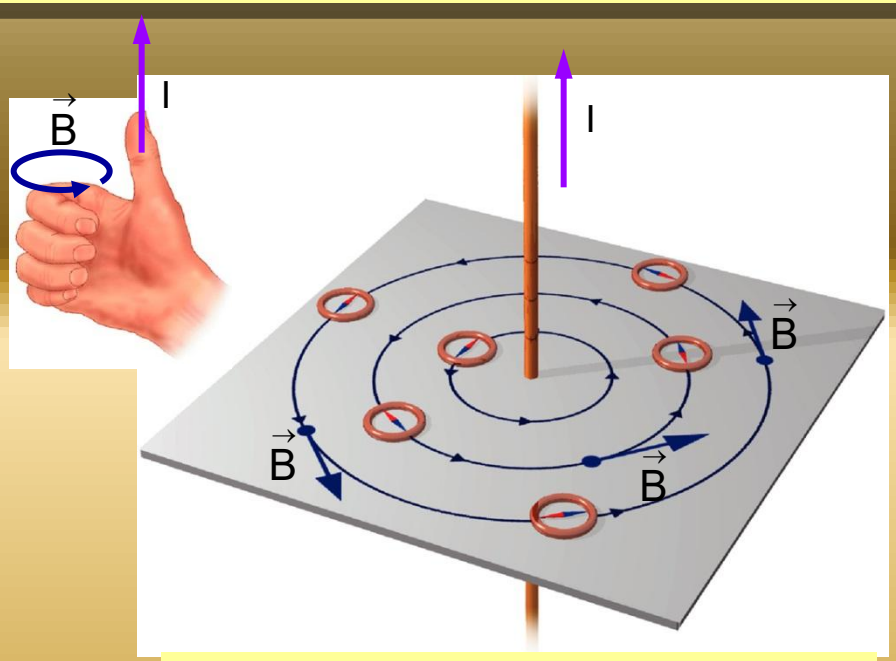
$$B = K_m \frac{q.v}{r^2}$$

2- CAMPO MAGNÉTICO GENERADO POR UNA CORRIENTE RECTILÍNEA

- Biot y Savart midieron el valor de la inducción magnética B, debida a un conductor rectilíneo largo por el que circula una corriente I en un punto situado a una distancia r:

$$B = k\frac{I}{r} \qquad k = \frac{\mu_0}{2\pi} \qquad \Rightarrow \quad B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

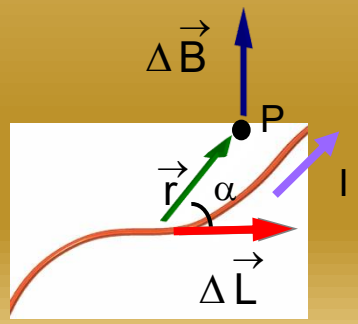
$$\mu_0 = 4\pi\, 10^{-7}\ \frac{N}{A^2}$$



Campo magnético creado por un conductor rectilíneo. Regla de la mano derecha

- El valor de la inducción magnética ΔB debida a un elemento de conductor de longitud ΔL por el que circula una corriente I en un punto a una distancia r del mismo es:

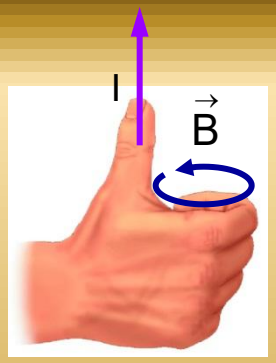
$$\Delta B = \frac{\mu_0 I}{4\pi}\frac{\Delta L\ \text{sen}\,\alpha}{r^2} \quad \Rightarrow \quad \Delta\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi}\frac{\Delta\vec{L}\,X\,\vec{r}}{r^3}$$

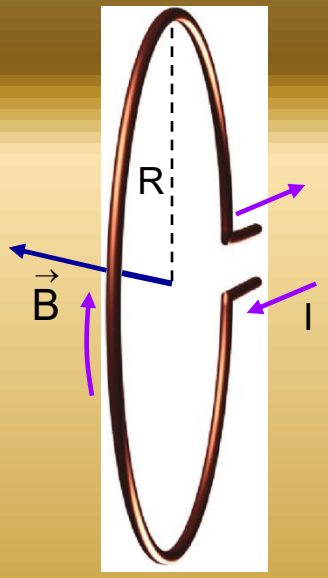


3-CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR UNA ESPIRA CIRCULAR

- La ley de Biot y Savart permite calcular el campo magnético en el centro de una espira circular de radio R por la que circula una corriente eléctrica I

- El campo es perpendicular a todos los elementos de corriente en que podemos descomponer la espira por ser perpendicular al plano que la contiene, por tanto:





$$\Delta B = \sum(\Delta B) = \sum\left(\frac{\mu_0 I}{4\pi}\frac{\Delta L}{r^2}\right) = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^2}\sum(\Delta L) \Rightarrow \sum(\Delta L) = 2\pi R \Rightarrow B = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

FUERZAS MAGNÉTICAS ENTRE DOS CONDUCTORES RECTILÍNEOS Y PARALELOS

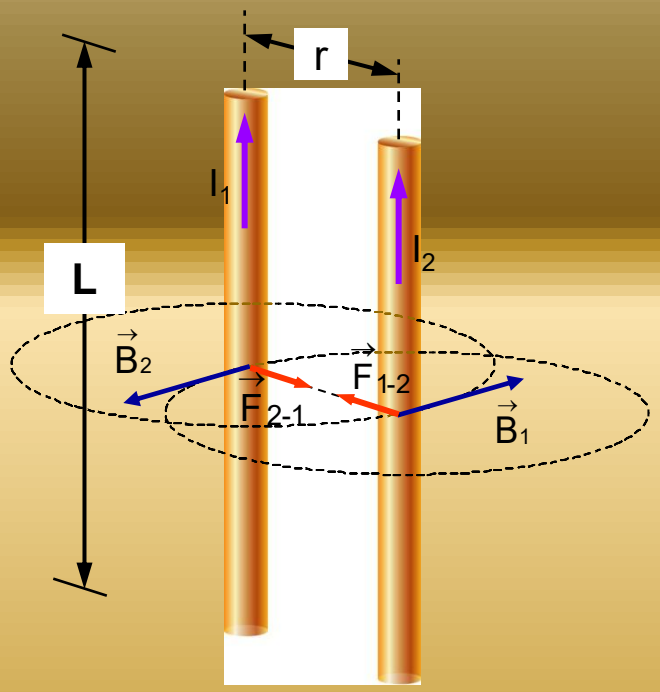
- El primer conductor genera un campo cuya inducción magnética en un punto cualquiera del segundo conductor es, según Biot y Savart:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r}$$

- B_1 es perpendicular al segundo conductor y al plano en el que se encuentran ambos conductores, y ejerce una fuerza magnética:

$$F_{1\text{-}2} = I_2 \, L \, B_1 \, \text{sen } 90$$

$$F_{1-2} = I_2 \, L \, \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r} = \frac{\mu_0 L \, I_1 \, I_2}{2\pi r}$$



Fuerza magnética entre dos conductores

- De igual forma se calcula $F_{2\text{-}1}$ que ejerce el segundo conductor sobre el primero.
- $F_{1\text{-}2}=F_{2\text{-}1}$ ley de acción y reacción

- **Si ambas corrientes tienen el mismo sentido, las fuerzas atraen entre sí a los conductores; si son de sentido contrario, los repelen**

LEY DE AMPERE

- El campo magnético creado por un conductor rectilíneo, puede escribirse de la forma:

$$B \cdot 2\pi r = \mu_0 I$$

- El primer miembro se denomina **circulación del vector $\vec{B}$ a lo largo de la circunferencia**

- Ampère demostró que esta expresión es válida para cualquier línea cerrada que englobe una o más corrientes, y enunció que:

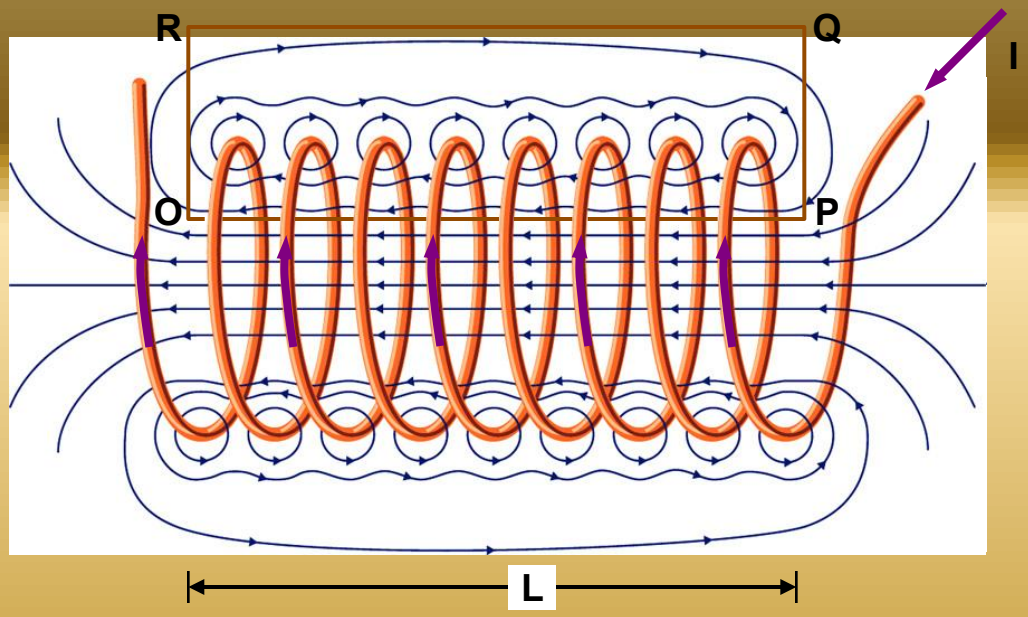
La circulación de $\vec{B}$ a lo largo de una línea cerrada es igual a μ_0 veces la intensidad de la corriente o corrientes encerradas por ella:

$$\oint \vec{B} . d\vec{L} = \mu_0 \sum I$$

André Marie Ampère

CAMPO MAGNÉTICO DEBIDO A UN SOLENOIDE

- Un solenoide es un conjunto de espiras circulares paralelas que pueden ser recorridas por la misma corriente



- Por el solenoide de longitud L, formado por N espiras circula una corriente I. La circulación a lo largo del rectángulo OPQR es:

$$\vec{B}.\vec{OR} + \vec{B}.\vec{RQ} + \vec{B}.\vec{QP} + \vec{B}.\vec{PO}$$

- La corriente encerrada por este rectángulo es NI. Aplicando la ley de Ampère:

$$\vec{B}.\vec{OR} + \vec{B}.\vec{RQ} + \vec{B}.\vec{QP} + \vec{B}.\vec{PO} = \mu_0(NI)$$

- Como el campo exterior es nulo, $\vec{B}.\vec{RQ} = 0$ y los vectores $\vec{QP}$ y $\vec{OR}$ son perpendiculares al campo

$(\vec{B}.\vec{QP} = \vec{B}.\vec{OR} = 0)$, resulta:

$$\vec{B}.\vec{PO} = \vec{B}.\vec{L} = BL\cos 0 = BL = \mu_0(NI)$$

$$B = \mu_0 n I$$

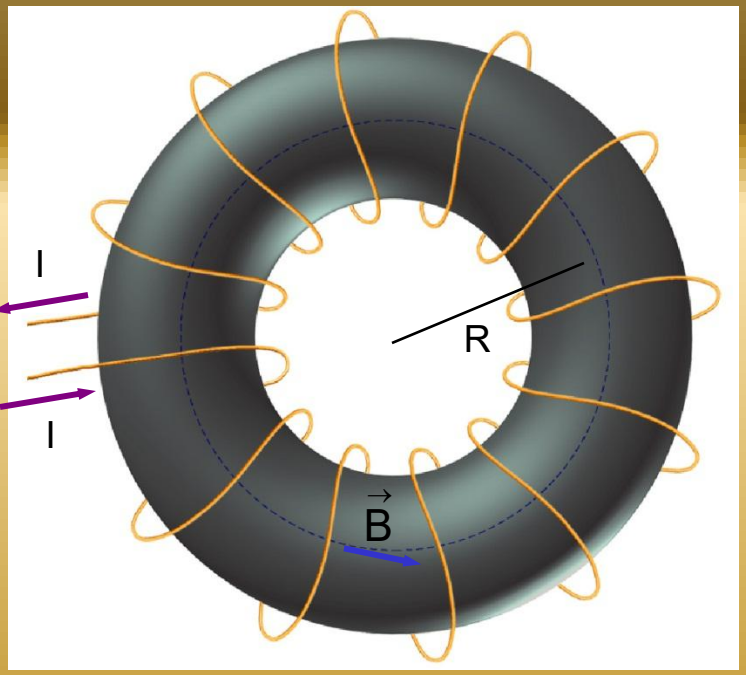
CAMPO MAGNÉTICO DEBIDO A UN TOROIDE

- Un toroide es un conjunto de espiras circulares arrolladas a un núcleo de hierro en forma de anillo (anillo toroidal)

- Para calcular el campo magnético en su interior, se considera un toroide de radio medio R por el que circula una intensidad de corriente I

- Considerando al toroide como a un solenoide de longitud L = $2\pi R$, el campo magnético en su interior será:

$$B = \mu_0 nI = \mu_0 \frac{N}{2\pi R} I$$



Las líneas de fuerza del campo magnético son circulares y el valor de la inducción magnética es prácticamente igual en todos los puntos interiores del toroide
En el exterior, el campo magnético puede considerarse nulo

MAGNETISMO NATURAL

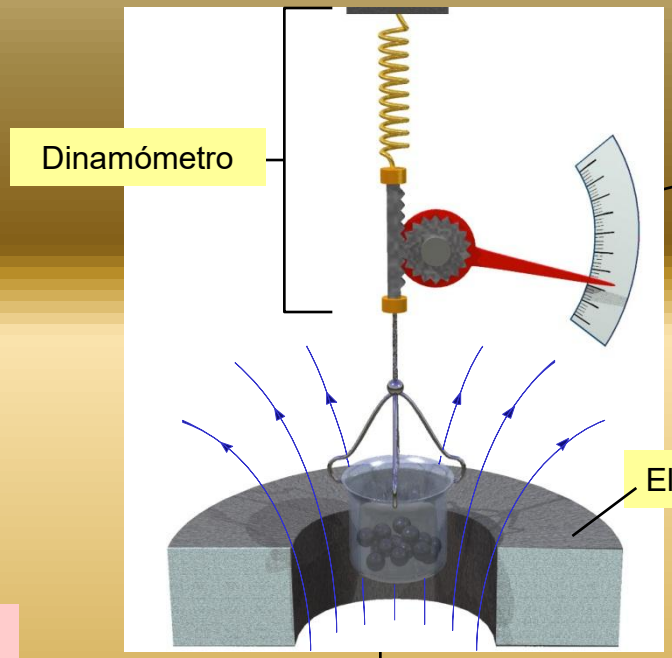
- En los átomos, los electrones en su movimiento alrededor del núcleo y en su giro sobre sí mismos, constituyen pequeñas espiras de corriente que generan un campo magnético, comportándose como pequeños imanes

- No todas las sustancias se comportan del mismo modo en presencia de un campo magnético

- Esto se comprueba, introduciéndola por uno de los extremos del electroimán y midiendo la fuerza que ejerce el campo magnético sobre ellas

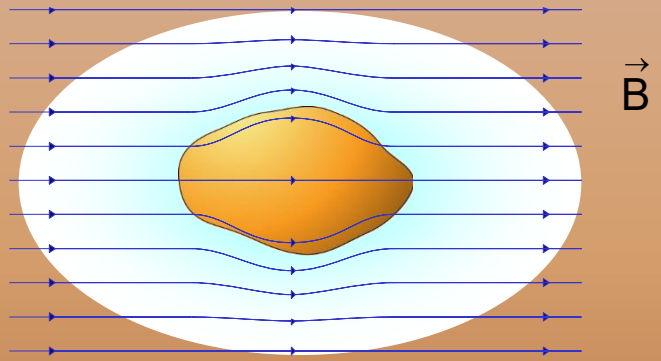
- Según su comportamiento, se clasifican:

  - sustancias diamagnéticas
  - sustancias paramagnéticas
  - sustancias ferromagnéticas



Medida de la fuerza magnética sobre una sustancia

SUSTANCIAS DIAMAGNÉTICAS



Comportamiento de una sustancia diamagnética

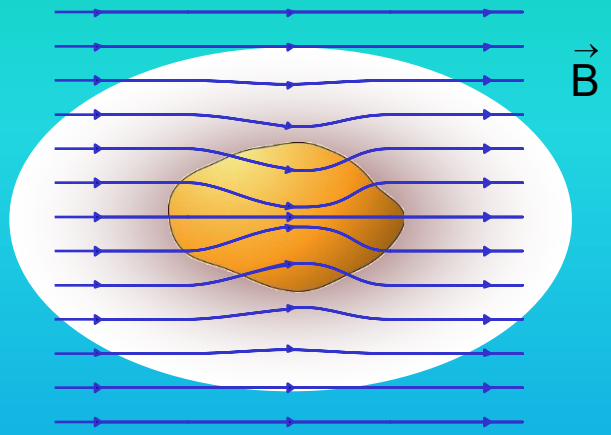
- El momento magnético de cada átomo es cero.
- No presenta efectos magnéticos observables.
- Al situar la sustancia en un campo externo, se induce un campo magnético muy débil de sentido opuesto al externo que tiende a alejar la sustancia del imán.
- Su permeabilidad magnética siempre es inferior a la del vacío μ_0
- El agua, el cloruro sódico, el alcohol, el oro, la plata, el cobre, ... son diamagnéticas.

SUSTANCIAS PARAMAGNÉTICAS

- El momento magnético de cada átomo no es cero debido al movimiento orbital de sus electrones y a su espín

- Al situar la sustancia en un campo externo, los momentos magnéticos tienden a alinearse con él, si bien no se consigue una alineación total debida a la agitación térmica

- Se genera un campo magnético resultante que es la causa de atracción hacia las zonas más intensas del campo



Comportamiento de una sustancia paramagnética

- Su permeabilidad magnética siempre es superior a la del vacío μ_0

- El estaño, platino, oxígeno y aluminio, son paramagnéticas (atraídas débilmente por los imanes)

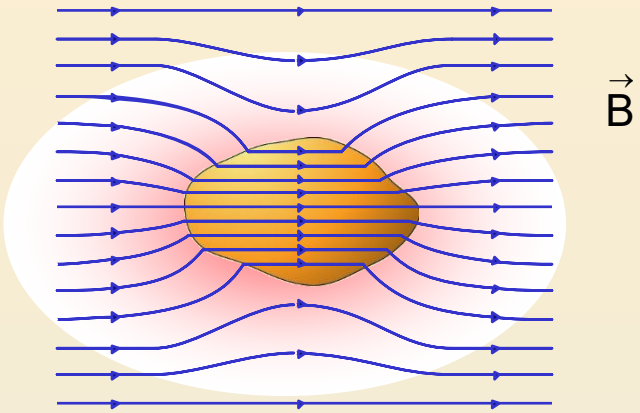
- El paramagnetismo aumenta al disminuir la temperatura, siendo máximo cerca del cero absoluto

SUSTANCIAS FERROMAGNÉTICAS

- Son sustancias atraídas muy intensamente por los imanes.

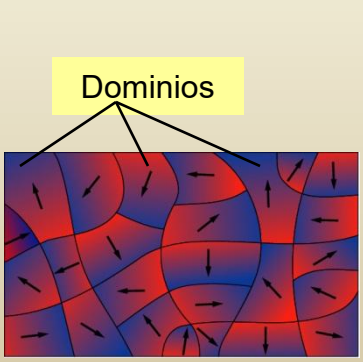
- Sus efectos desaparecen por encima de una temperatura, característica de cada sustancia, llamada punto de Curie.

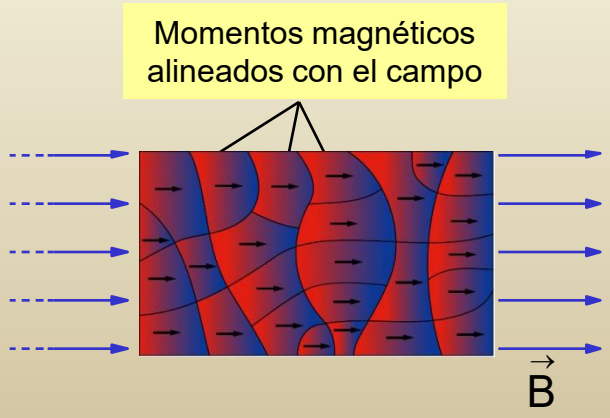
- Sus átomos están agrupados en grandes dominios, y en cada uno de ellos, los momentos magnéticos de todos sus átomos, presentan una misma orientación debido a la interacción entre ellos.

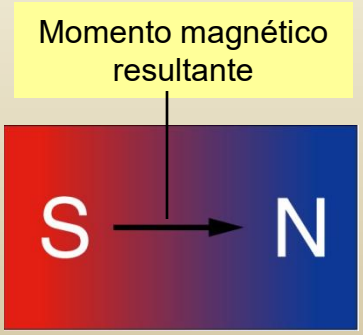


Comportamiento de una sustancia ferromagnética

- Por encima del punto de Curie, la agitación térmica desalinea los dominios, y la sustancia pasa a comportarse como paramagnética.

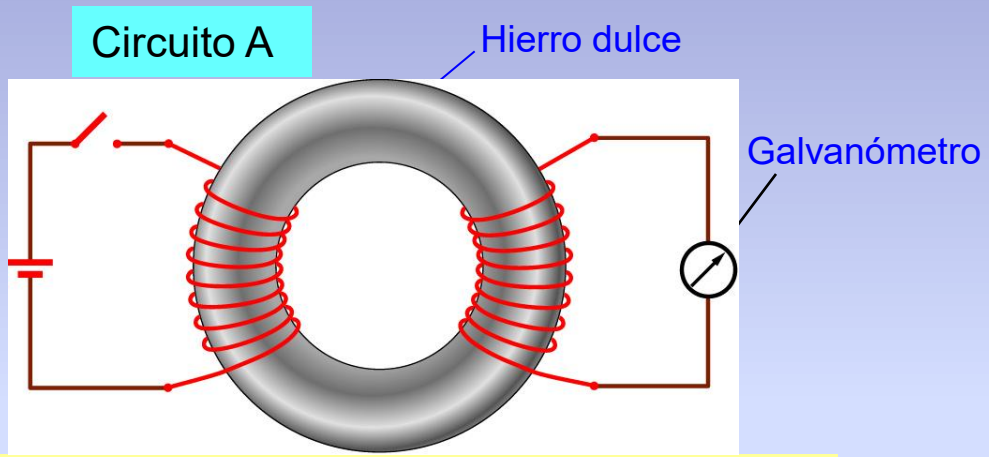


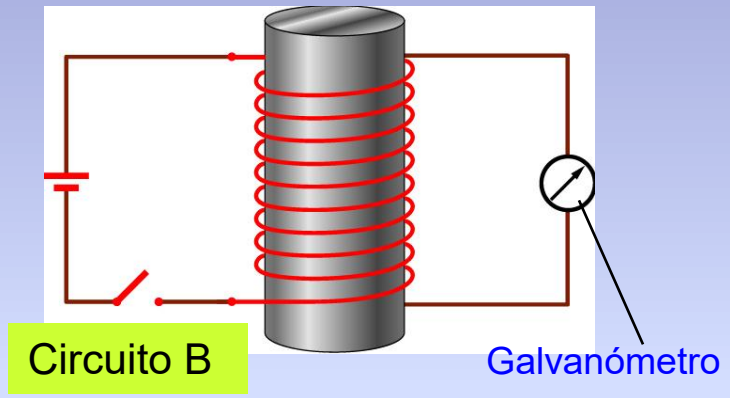




LOS EXPERIMENTOS DE FARADAY

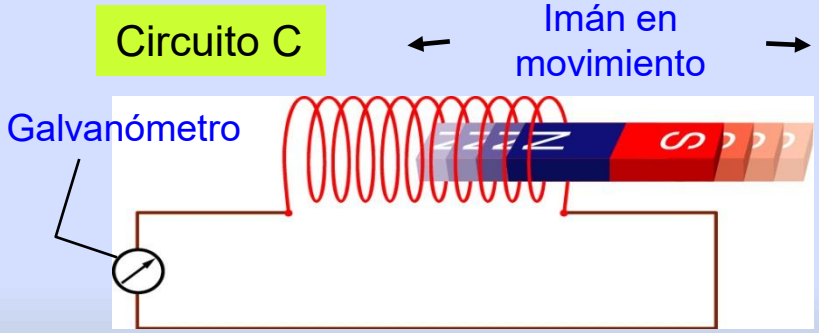
- Oersted mostró que la corriente eléctrica produce un campo magnético, pero ¿se cumple el proceso inverso?



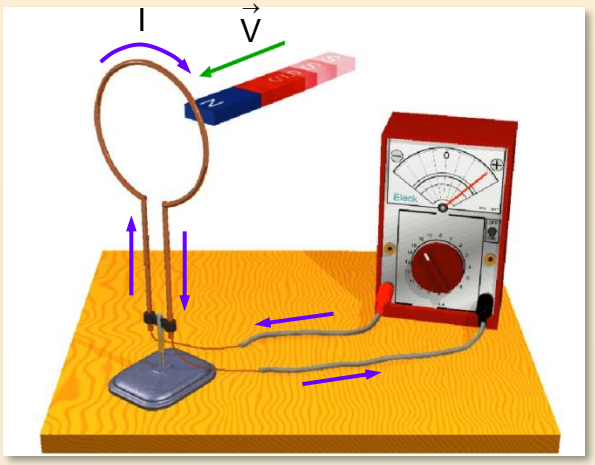


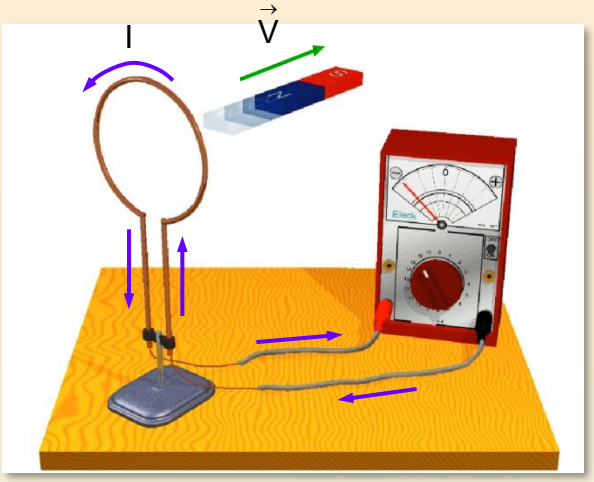
- En 1831, Faraday comprobó que en un circuito, el galvanómetro indicaba el paso de la corriente cuando se abría el circuito (circuito A)

- En los circuitos B y C sin contacto eléctrico, el movimiento del circuito B genera una corriente eléctrica inducida en en el circuito C. El mismo efecto se produce si en lugar de una bobina se utiliza un imán en movimiento



LA INDUCCIÓN MAGNÉTICA



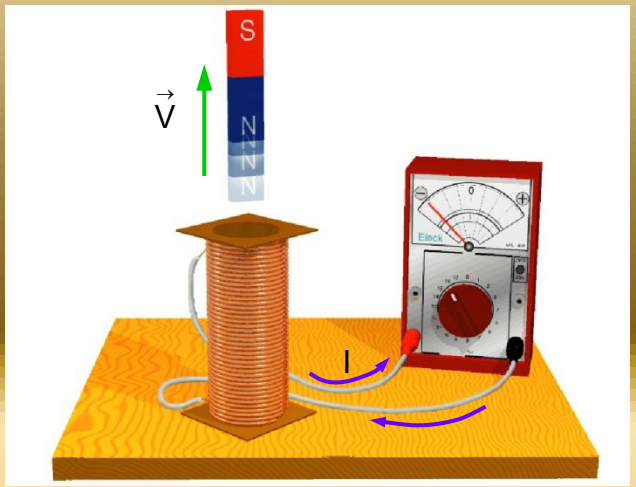


- Michael Faraday demostró mediante un experimento, que se podía generar una corriente eléctrica inducida a partir de un campo magnético

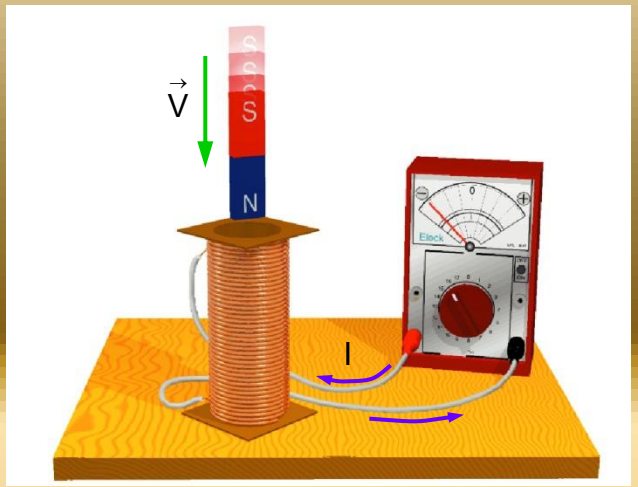
- Al acercar el imán a una espira conductora que no está conectada a ninguna fuente de alimentación eléctrica, el galvanómetro detectaba el paso de corriente mientras el imán estuviera en movimiento

- El sentido de la corriente al acercar el imán es opuesto al que tiene cuando se aleja
- Si se mantiene fijo el imán y se mueve la espira, el resultado es el mismo

Aparece una corriente inducida mientras haya movimiento relativo entre la espira y el imán



Al sacar el imán se produce una corriente inducida

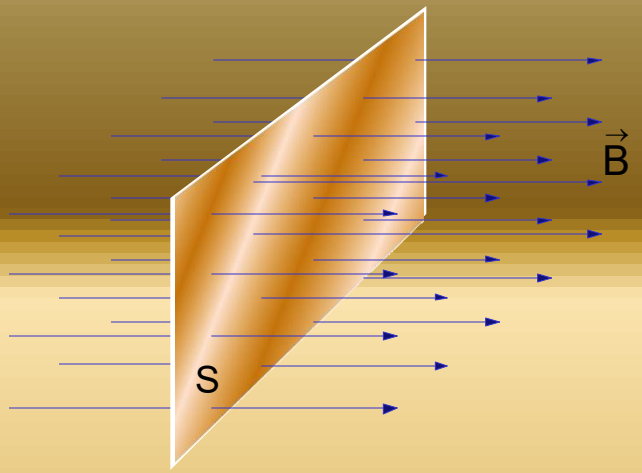


Al introducir el imán se produce la misma corriente inducida pero de sentido contrario

- Esto significa que se ha producido en el circuito una fuerza electromotriz que ha dado lugar a la corriente. Este fenómeno se denomina inducción electromagnética

A partir de campos magnéticos es posible inducir en un circuito una fuerza electromotriz capaz de generar corriente eléctrica sin establecer conexiones con ninguna fuente de alimentación

FLUJO MAGNÉTICO A TRAVÉS DE UNA SUPERFICIE PLANA



Placa perpendicular al campo magnético

El producto B.S se denomina flujo magnético y representa el número de líneas que atraviesan la superficie

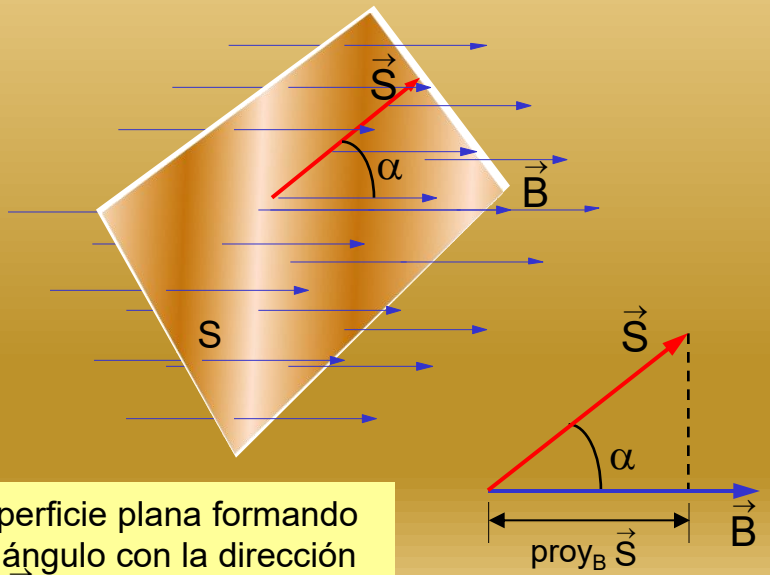
$$\phi = B.S$$

Si forma un ángulo con el campo magnético

Para hallar el flujo se proyecta la superficie según la dirección del campo

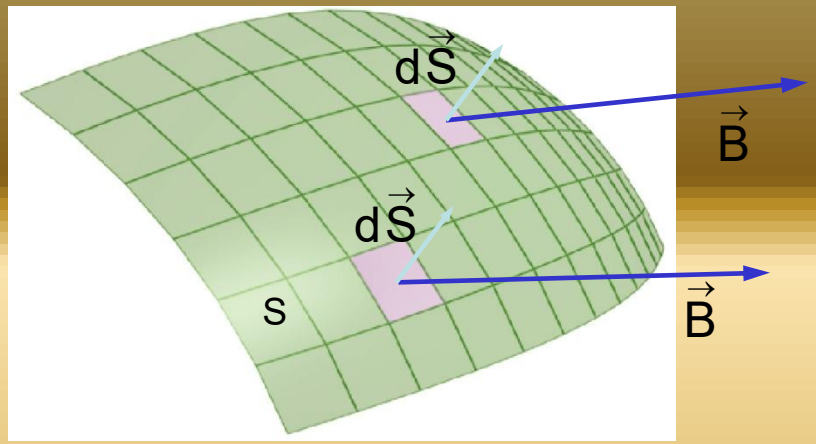
$$\phi = B.(S\cos\alpha) = \vec{B}\cdot\vec{S} \Rightarrow \phi = \vec{B}\cdot\vec{S}$$

La unidad de flujo en el S.I. es el weber (wb), que se define como el flujo magnético que atraviesa una superficie de 1 m^2 situada perpendicularmente a un campo de 1 T



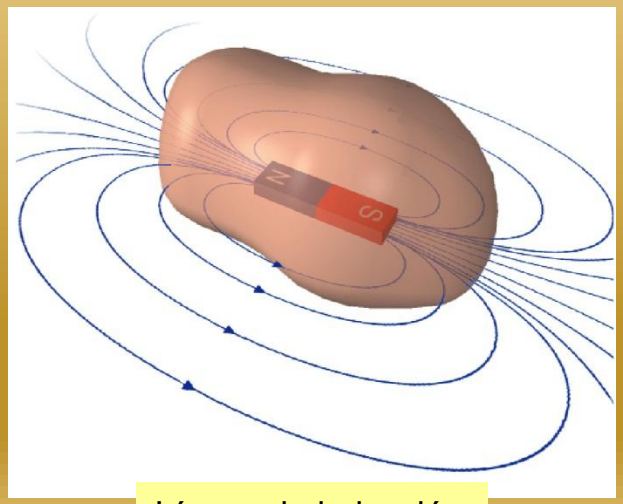
Superficie plana formando un ángulo con la dirección de $\vec{B}$

FLUJO MAGNÉTICO A TRAVÉS DE UNA SUPERFICIE CUALQUIERA



- El flujo elemental $d\phi$ para cada elemento de superficie $\vec{dS}$ será $d\phi = \vec{B}.\vec{dS}$
- El flujo a través de toda la superficie es:

$$\phi = \int_S \vec{B}.\vec{dS}$$



Líneas de inducción

- En las superficies cerradas, la imposibilidad de obtener un polo magnético aislado implica que las líneas de inducción magnéticas se cierran sobre sí mismas
- Cada línea de inducción atraviesa un número par de veces la superficie cerrada, siendo el flujo total nulo

LEY DE FARADAY - HENRY

- La fuerza electromotriz $\mathcal{E}$ inducida en un circuito es igual a la variación del flujo magnético ϕ que lo atraviesa por unidad de tiempo:

$$\mathcal{E} = \frac{d\phi}{dt}$$

- En el caso de una espira, al acercar o alejar el imán, la variación del flujo magnético aumentaba o disminuía porque así lo hacía el campo magnético

- Cuando se mantienen fijos el imán y la espira, si esta se deforma, el flujo a través de ella varía al modificar su superficie, aunque el campo permanezca constante

- La corriente inducida es mayor cuanto mayor sea la rapidez de la variación de su flujo, es decir, cuanto más rápidamente acerquemos o alejemos el imán a la espira, o cuanto más rápida sea su deformación

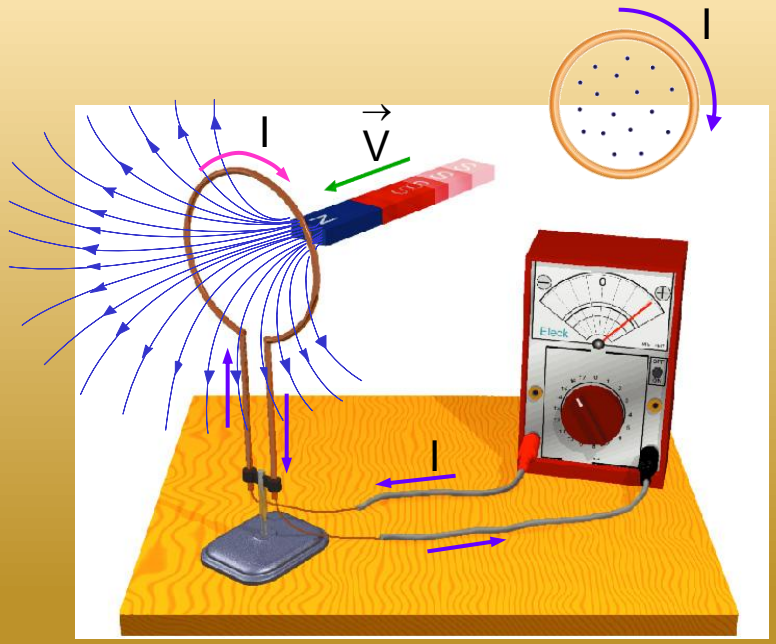
La ley de Faraday-Henry explica el valor de la fuerza electromotriz inducida, pero no su sentido, que investigado por Lenz

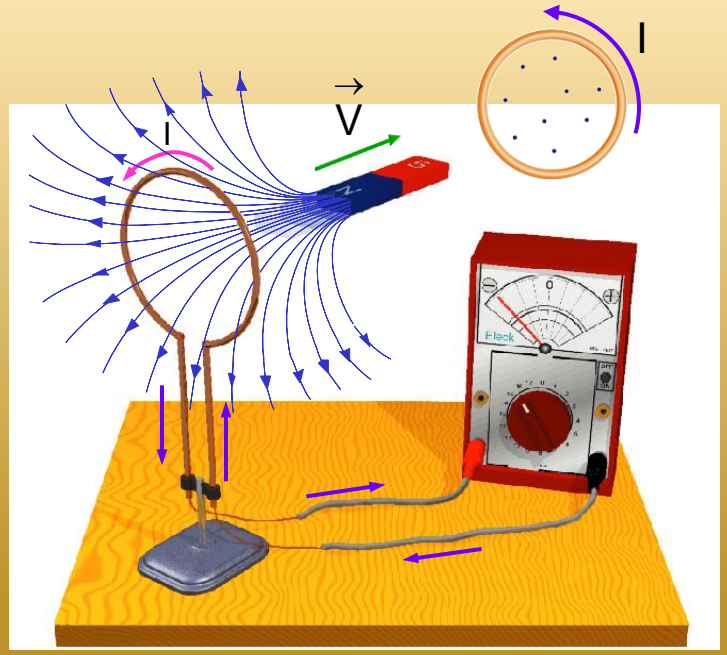
LEY DE LENZ

- El sentido de la corriente inducida se opone a la variación del flujo que la produce

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt}$$

- Al acercar el imán a la espira, aumenta el campo magnético que la atraviesa, y el flujo





- La corriente inducida circula en el sentido en el que se genera un campo magnético por la espira, cuyo flujo tiende a contrarrestar el del campo magnético del imán

GENERACIÓN DE CORRIENTE ELÉCTRICA CON GRANDES IMANES FIJOS Y MOVIENDO EL CIRCUITO

Si vamos sacando la espira el flujo disminuye, como se trata de un flujo entrante, la corriente inducida en la espira irá en el sentido de las agujas del reloj para generar otro flujo entrante que compense la disminución.

Llamamos x al espacio recorrido por la espira dentro del campo, es por lo tanto la porción de espira dentro del campo en cada momento.

L es la longitud de cada lado de la espira y vectorialmente va en el sentido de la corriente. $\vec{L}$

Como ya sabemos la fuerza que sufre un cable eléctrico sumergido en un campo magnético es: $\vec{F} = I.(\vec{L}x\vec{B})$

como el sen90º=1 queda. $F = I.L.B$

La superficie de espira sumergida en el campo va cambiando a medida que la movemos pero sería: S=L.x

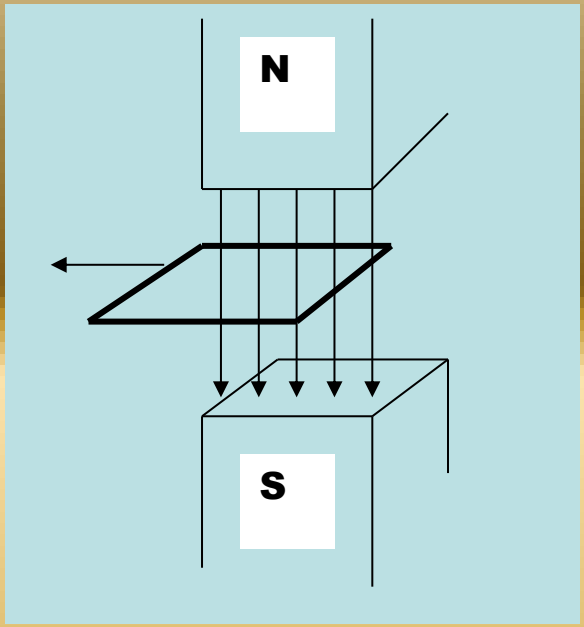
Empleando la definición de flujo magnético: $\phi = \vec{B}.\vec{S}$

como cos 0º=1 queda $\phi = B.S = B.L.x$ y aplicando la ley de Faraday:

$$\varepsilon = \frac{d\phi}{dt} = \frac{dB.L.x}{dt}$$

como tanto el campo como la longitud de la espira son constantes:

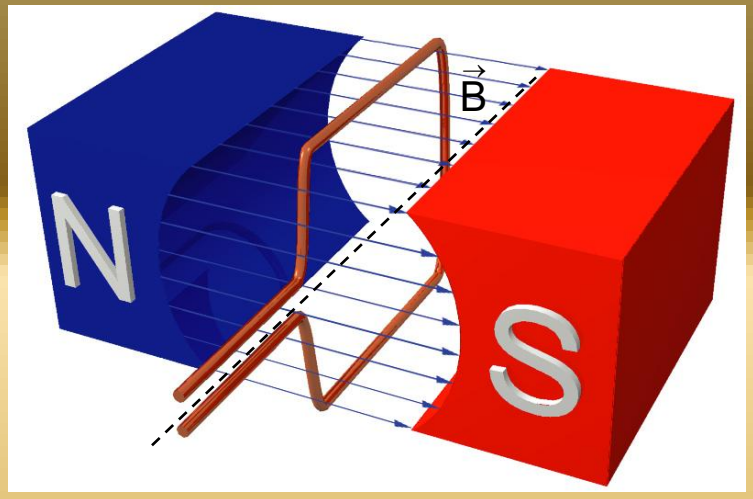
$$\varepsilon = B.L.\frac{dx}{dt} = B.L.v$$

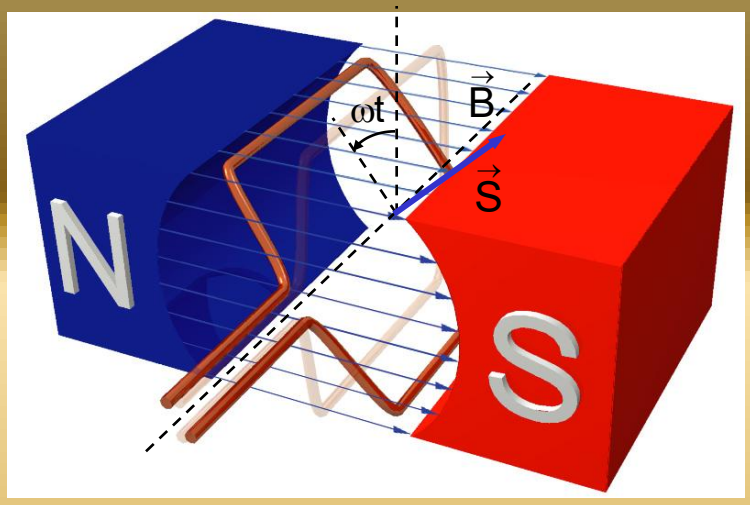


La fuerza electromotriz que hace circular la corriente por la espira es directamente proporcional al campo magnético, a la longitud de la espira y a la velocidad con que esta se mueve dentro del campo.

$$\varepsilon = B.L.v$$

PRODUCCIÓN DE CORRIENTE ALTERNA





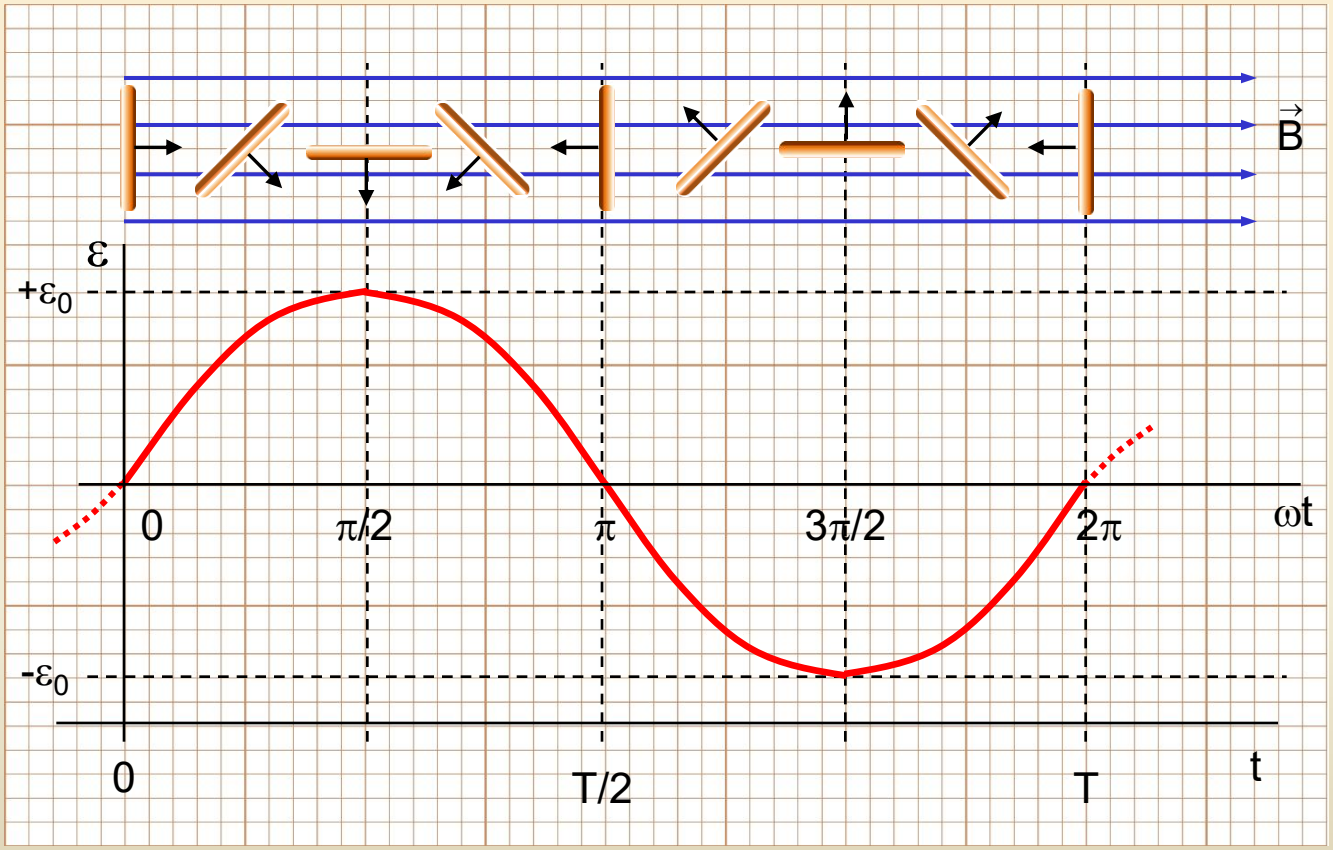
- La espira, situada inicialmente perpendicular al campo, gira con velocidad ω constante
- El flujo que la atraviesa es $\phi = \vec{B}.\vec{S} = BS\cos\alpha$
- Por ser un MCU: $\alpha = \omega t$

$\Rightarrow$ $\phi = B\,S\cos\omega t$

- Según Faraday-Henry y Lenz: $\mathcal{E} = BS\,\omega \operatorname{sen}\omega t$
- Para una bobina de N espiras: $\mathcal{E} = NBS\,\omega \operatorname{sen}\omega t$
- La f.e.m. máxima es: $\mathcal{E}_0 = NBS\,\omega$

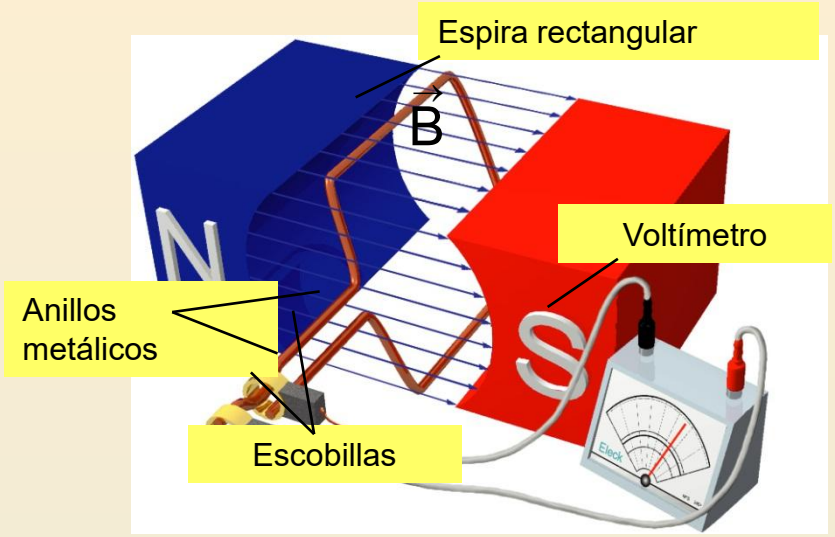
$\Rightarrow$ $\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \operatorname{sen}\omega t$

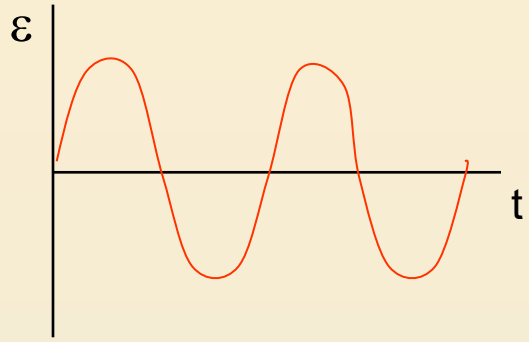
GRÁFICA DE LA FUERZA ELECTROMOTRIZ SINUSOIDAL



$\varepsilon = \varepsilon_0 \operatorname{sen} \omega t$

ESQUEMA DE UN ALTERNADOR

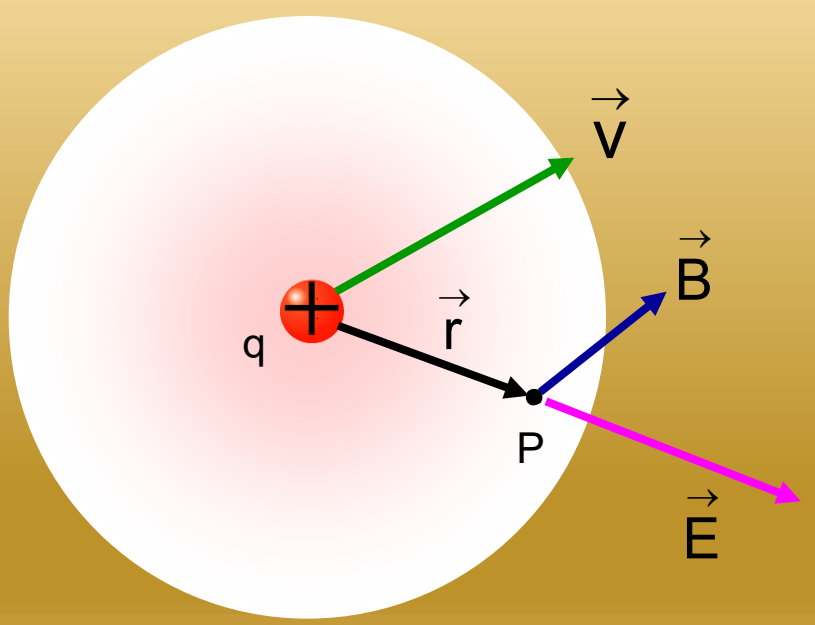


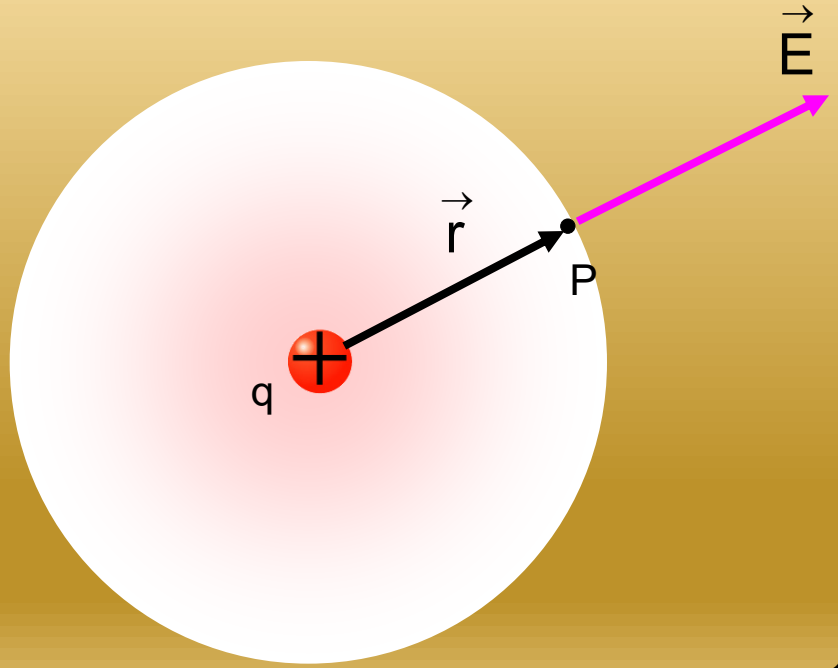


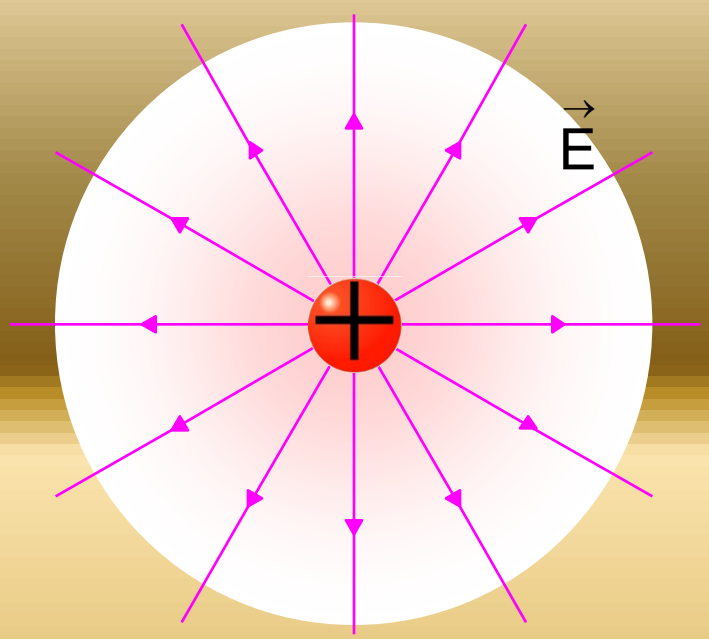
- La bobina gira con velocidad constante en un campo magnético uniforme creado por el imán
- Se induce así una f.e.m. sinusoidal que varía de sentido 2 veces cada período (corriente alterna)
- Los extremos de la espira se conectan al circuito externo mediante escobillas
- La energía mecánica necesaria para girar la bobina se transforma en energía eléctrica
- Alternadores más complejos constan de inductor (imán o electroimán) e inducido (circuito donde se produce la f.e.m.). La parte móvil es el rotor y la fija, el estátor

PARECIDOS Y DIFERENCIAS ENTRE CAMPOS ELÉCTRICO Y MAGNÉTICO

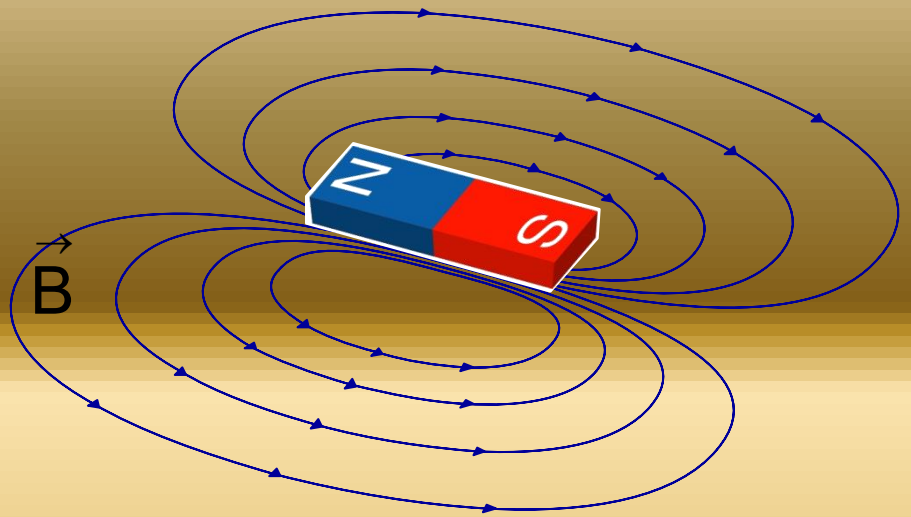
- Ambos campos tienen su origen en las cargas eléctricas
- Una carga eléctrica en movimiento produce un campo eléctrico y un campo magnético
- Una carga en reposo genera solo un campo eléctrico







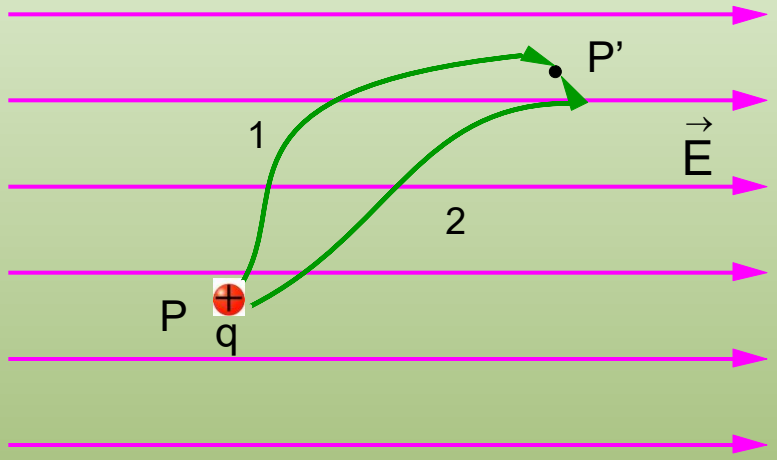
Líneas de campo eléctrico



Líneas de campo magnético

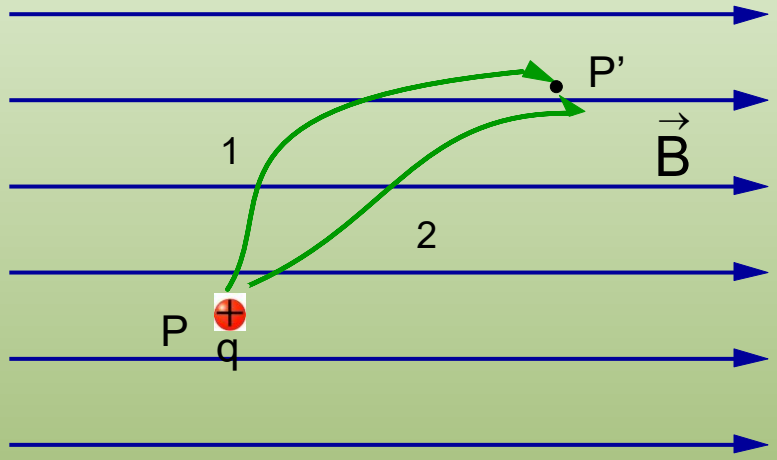
- Las líneas de fuerza del campo eléctrico son líneas abiertas: comienzan o terminan en una carga, pero pueden extenderse al infinito
- Las líneas de fuerza del campo magnético son líneas cerradas: nacen en un polo magnético y finalizan en el otro de distinta polaridad
- Pueden encontrarse cargas eléctricas aisladas, pero los polos magnéticos se presentan siempre por parejas. No hay polos magnéticos aislados

La constante eléctrica y la magnética dependen del medio



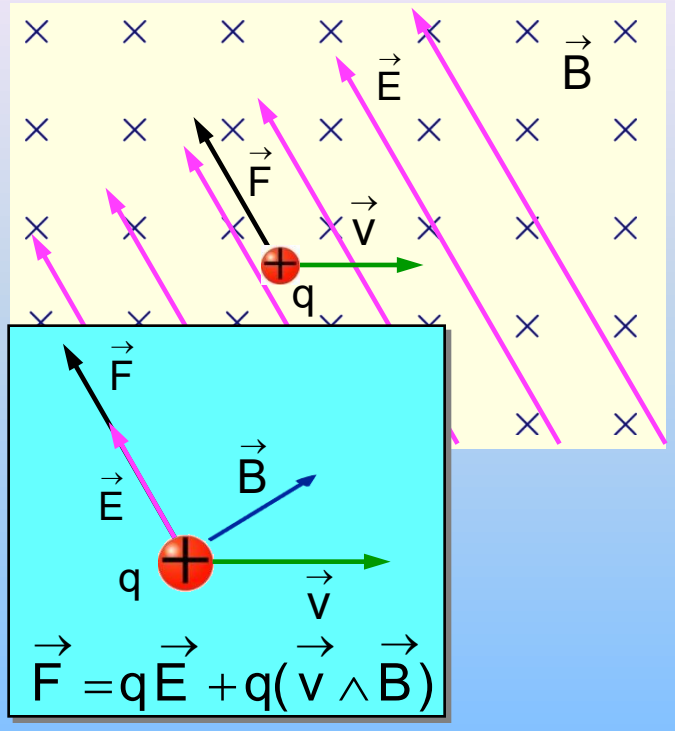
$$T_1 = T_2$$

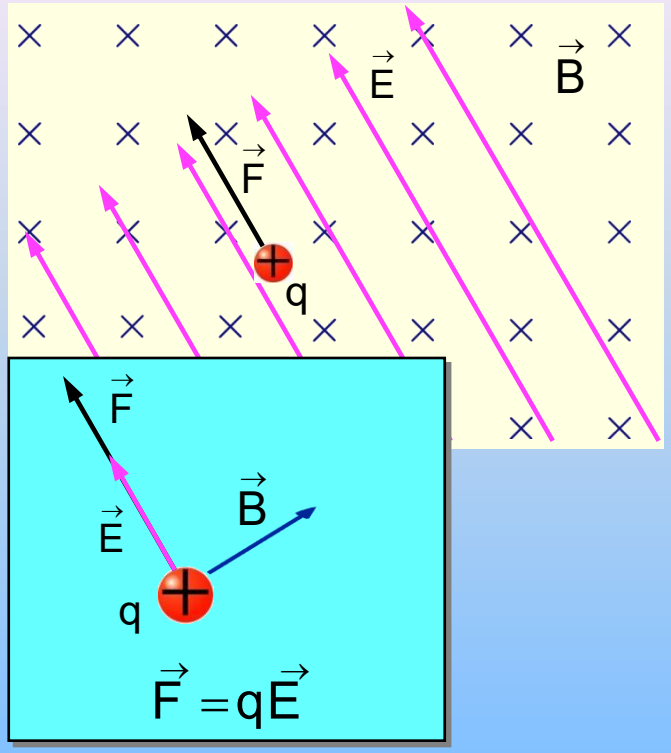
- El campo eléctrico es un campo conservativo: el trabajo necesario para mover una carga entre dos puntos del campo no depende de la trayectoria seguida. Es posible definir un potencial eléctrico escalar para describir el campo



$$T_1 \neq T_2$$

- El campo magnético es un campo no conservativo: el trabajo necesario para mover una carga entre dos puntos del campo depende de la trayectoria seguida. No es posible definir un potencial escalar para describir el campo





- El campo eléctrico y el campo magnético ejercen fuerzas sobre cargas en movimiento según la expresión de la fuerza de Lorentz:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q(\vec{v} \wedge \vec{B})$$

- El campo eléctrico también ejerce fuerzas sobre cargas en reposo.

LA SÍNTESIS ELECTROMAGNÉTICA

- Maxwell calculó la velocidad **c** de propagación de las ondas electromagnéticas en el vacío que resultaba al aplicar el conjunto de sus ecuaciones, siendo su valor:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$$

siendo:

ε_0 : la constante dieléctrica del vacío ($\varepsilon_0 = 8{,}9.10^{-12}\ C^2/N.m^2$)

μ_0 : la permitividad magnética del vacío ($\mu_0 = 4\pi\ 10^{-7}\ N/A^2$)

- Sustituyendo estas constantes por sus valores numéricos $\Rightarrow$ $c = 3.10^8$ m/s

- La velocidad de las ondas electromagnéticas resultaba ser igual a la velocidad de la luz, por lo que Maxwell supuso que la luz era una onda electromagnética y Hertz lo confirmó experimentalmente

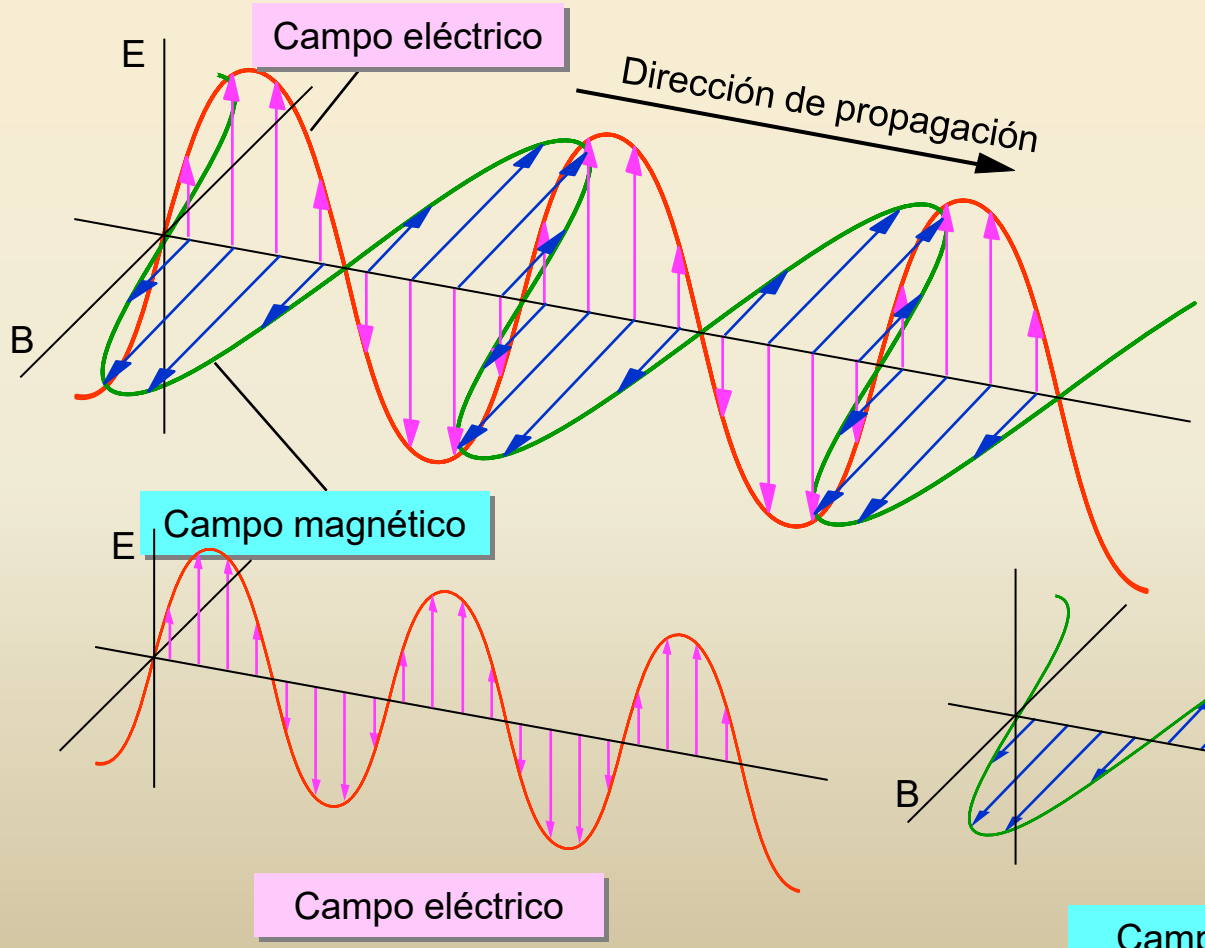
- La síntesis electromagnética unifica en una sola teoría coherente tres disciplinas consideradas independientes hasta principios del siglo XIX: la electricidad, el magnetismo y la óptica

- Las ondas electromagnéticas corresponden a la propagación en el espacio de campos eléctricos y magnéticos variables

- Maxwell dedujo una ecuación de ondas para los vectores $\vec{E}$ y $\vec{B}$ y mostró que la propagación de campos eléctricos y magnéticos tendría todas las características propias de una onda: reflexión, refracción, difracción e interferencias

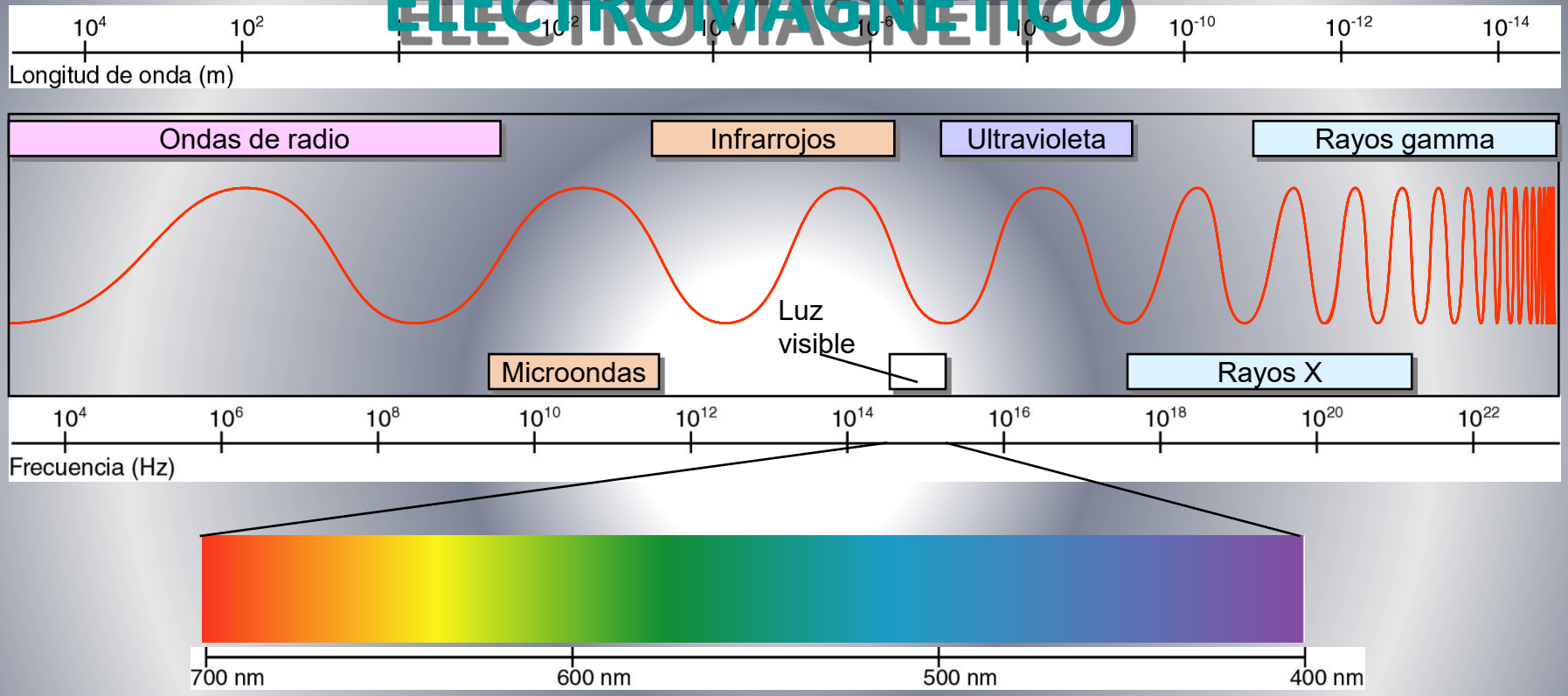
- En cada punto del espacio, los vectores $\vec{E}$ y $\vec{B}$ son perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación (son ondas transversales)

- La teoría electromagnética de Maxwell había llevado a la predicción de las ondas electromagnéticas; el propio Maxwell señaló que para comprobar la teoría se precisaba la producción de estas ondas



- Las ondas electromagnéticas se propagan en el vacío sin necesidad de soporte material. El paso de estas ondas por un punto produce en él una variación de los campos eléctrico y magnético

EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO



- Las ondas electromagnéticas difieren entre sí en su frecuencia y en su longitud de onda, pero todas se propagan en el vacío a la misma velocidad

- Las longitudes de onda cubren una amplia gama de valores que se denomina espectro electromagnético

Resumen

DEFINICIONES

El **momento de dipolo magnético** $\vec{\boldsymbol{\mu}}$ de una espira portadora de corriente I es

$$\vec{\boldsymbol{\mu}} \equiv I\vec{\mathbf{A}}$$

donde el vector de área $\vec{\mathbf{A}}$ es perpendicular al plano de la espira y $|\vec{\mathbf{A}}|$ es igual al área de la espira. La unidad SI de $\vec{\boldsymbol{\mu}}$ es $\mathrm{A \cdot m^2}$.

CONCEPTOS Y PRINCIPIOS

La fuerza magnética que actúa sobre una carga q que se mueve con una velocidad $\vec{\mathbf{v}}$ en un campo magnético $\vec{\mathbf{B}}$ es

$$\vec{\mathbf{F}}_B = q\vec{\mathbf{v}} \times \vec{\mathbf{B}}$$

La dirección de esta fuerza magnética es perpendicular tanto a la velocidad de la partícula como al campo magnético. La magnitud de esta fuerza es

$$F_B = |q|vB \operatorname{sen} \theta$$

donde θ es el ángulo más pequeño entre $\vec{\mathbf{v}}$ y $\vec{\mathbf{B}}$. La unidad SI de $\vec{\mathbf{B}}$ es el **tesla** (T), donde $1\ \mathrm{T} = 1\ \mathrm{N/A \cdot m}$.

Si una partícula con carga se mueve en un campo magnético uniforme, de modo que su velocidad inicial es perpendicular al campo, la partícula se mueve en un círculo, cuyo plano es perpendicular al campo magnético. El radio de la trayectoria circular es

$$r = \frac{mv}{qB}$$

donde m es la masa de la partícula y q su carga. La rapidez angular de la partícula con carga es

$$\omega = \frac{qB}{m}$$

Si un conductor recto de longitud L porta una corriente I, la fuerza ejercida sobre dicho conductor cuando se coloca en un campo magnético uniforme $\vec{\mathbf{B}}$ es

$$\vec{\mathbf{F}}_B = I\vec{\mathbf{L}} \times \vec{\mathbf{B}}$$

donde la dirección de $\vec{\mathbf{L}}$ es en la dirección de la corriente y $|\vec{\mathbf{L}}| = L$.

Si un alambre con forma arbitraria que porta una corriente I se coloca en un campo magnético, la fuerza magnética ejercida sobre un segmento muy pequeño $d\vec{\mathbf{s}}$ es

$$d\vec{\mathbf{F}}_B = I\, d\vec{\mathbf{s}} \times \vec{\mathbf{B}}$$

Para determinar la fuerza magnética total sobre el alambre, debe integrar la ecuación 29.11 en todo el alambre, teniendo en mente que tanto $\vec{\mathbf{B}}$ como $d\vec{\mathbf{s}}$ pueden variar en cada punto.

El momento de torsión $\vec{\boldsymbol{\tau}}$ sobre una espira de corriente colocado en un campo magnético uniforme $\vec{\mathbf{B}}$ es

$$\vec{\boldsymbol{\tau}} = \vec{\boldsymbol{\mu}} \times \vec{\mathbf{B}}$$

La energía potencial del sistema de un dipolo magnético en un campo magnético es

$$U = -\vec{\boldsymbol{\mu}} \cdot \vec{\mathbf{B}}$$